



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
-----  
INSTITUT D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR D'ANTSIRABE  
- VAKINANKARATRA  
-----  
MENTION : GENIE CIVIL  
-----  
PARCOURS : SCIENCES ET IGENERIE DES MATERIAUX  
-----



**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme**

**MASTER-TITRE INGENIEUR EN SCIENCES ET INGENERIE DES MATERIAUX**

**FORMULATIONS ET MODELISATIONS  
MATHEMATIQUES DE MATERIAUX  
COMPOSITES A BASE DE SCIURE DE BOIS PAR  
PLAN D'EXPERIENCE**

Présenté par : Monsieur

RIVOANDRIAMANJATO Miariniaina

Soutenu le 03 Décembre 2022

Devant les membres du jury composé de :

Président : Docteur RAKOTOARISOA Jean Yves Erica

Encadreur : Docteur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain

Examineurs : Monsieur RAZAFIMANDIMBY Andriaina David

Monsieur RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé

Monsieur RAKOTONDRAVOHITRA Rinah Masinandrianina

Monsieur RAKOTOASIMBOLA Sylvain Pascal

**Promotion 2021**



## REMERCIEMENTS

Je remercie le Seigneur pour sa grâce, la force et l'inspiration nécessaire durant mes études et la réalisation de ce mémoire.

La finalisation de ce travail a été faite grâce à de nombreuses personnes auquel j'adresse mes profonds remerciements.

Je tiens d'abord à remercier les anciens Directeurs de l'Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra (IES-AV) qui se sont succéder pour que je puisse poursuivre ma formation :

- **Professeur RAKOTONINDRAINY**, Professeur Titulaire,
- **Professeur RAJAONARISON Eddy Franck**, qui à veiller personnellement au bon déroulement de nos études au sein de l'IES-AV.

Merci au nouveau Directeur d'avoir pris le flambeau :

- **Docteur ANTSONANTENAINARIVONY Ononamandimby**.

Je remercie également :

- **Docteur RANDRIANARIVELO Lanja**, l'ancien chef de mention du Génie civil au sein de l'IESAV pour ses lourdes taches de diriger le département ;
- **Monsieur RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé**, notre nouveau chef de mention ;

J'exprime ma gratitude envers :

- **Docteur RAKOTOARISOA Jean Yves Erica**, qui a accepté avec bienveillance de présider cette soutenance.

Un grand respect pour mon encadreur :

- **Docteur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain**, qui m'a transmis la connaissance des modélisations mathématiques par plan d'expérience et veiller à la réussite de ce mémoire. Ces précieux conseils m'ont toujours éclairé dans mes recherches.

Un vif remerciement aux examinateurs pour leur jugement :

- **Monsieur RAZAFIMANDIMBY Andrianiaina David**
- **Monsieur RANDRIAMIHAJA Samimananindrina Jean Aimé**
- **Monsieur RAKOTONDRAVOHITRA Rinah Masinandrianina**
- **Monsieur RAKOTOASIMBOLA Sylvain Pascal**

Je ne saurais oublier les Responsables administratifs et les Enseignants de l'IES-AV pour leur dévouement dont ils ont fait preuve et tout le savoir que j'ai acquis.

Je suis aussi très reconnaissant envers le Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques (CNRIT) Fiadanana Tsimbazaza et tous ses responsables de m'avoir prêté leur laboratoire et effectué un stage de réalisation de mémoire de fin d'études, avec de nombreux échanges effectués lors du stage.

Merci aussi au Garage Avotra Ambohimena Antsirabe pour leur aide et le matériel dont ils m'ont fourni.

J'adresse mes remerciements à mes Parents qui m'ont soutenue sur tous les points pendant mes études.

Et enfin mais pas des moindres, merci à la famille et les amis fidèle qui m'ont aidé et encouragé pour la contribution de ce travail.

**Merci du fond du cœur**

# **SOMMAIRE**

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

LISTES DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES PHOTOS

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION

PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MATIERES PREMIERES

CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES PLAN D'EXPERIENCES

PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES

CHAPITRE IV : PREPARATIONS ET CARACTERISATIONS DES MATIERES PREMIERES

CHAPITRE V : FORMULATION ET FABRICATION DES EPROUVETTES

PARTIE 3 : MODELISATIONS PAR PLAN D'EXPERIENCE

CHAPITRE VI : APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES DANS LE LOGICIEL JMP

PARTIE 4 : APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

CHAPITRE VII : ETUDES DE PRIX

CHAPITRE VIII : APPROCHES ENVIRONNEMENTALES

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

RESUME

## **LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES**

CNRIT : Centre National des Recherches Industrielles et Technologiques

AFNOR : Association Française de Normalisation

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture

DOE : Design Of Experiments

ANOVA : Analysis Of Variance

Rc : Résistance à la compression

Rf : Résistance à la flexion

CBR : Cendre de Balle de Riz

RHA : Rice Husk Ash

CRH : Carbonized Rice Husk

d : densité

U : unité

Ar : Ariary

$\lambda$  : conductivité thermique

MPa : Méga Pascal

°C : degré Celsius

m<sup>2</sup>/Kg : mètre carré par kilogramme

m<sup>2</sup>/°C.W : mètre carré par degré Celsius fois Watt

Kg : Kilogramme

m : mètre

% : pourcent

Kg/L : Kilogramme par Litre

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques exemples de matériaux composites selon leur matrice .....	7
Tableau 2 : Critère d'hydraulicité .....	18
Tableau 3 : Caractéristique physique des différents types de chaux.....	19
Tableau 4 : Composition chimique des cendres de balle de riz RHA.....	24
Tableau 5 : La chaleur massique de la silice .....	26
Tableau 6 : Conductivité thermique de la silice .....	27
Tableau 7 : Séries de tamis normalisé pour le sable .....	30
Tableau 8 : Caractéristiques des principaux constituants du sable .....	32
Tableau 9 : Calcul des coefficients $A_0, A_1, A_2, A_3$ de trois facteurs à deux niveaux dans le cas des matrices de Hadamard.....	42
Tableau 10 : Matrice d'expérience pour les plans d'expérience à deux niveaux et à 2 facteurs .....	45
Tableau 11 : Principaux logiciels de plans d'expériences .....	53
Tableau 12 : Caractéristique physique de la sciure de bois.....	55
Tableau 13 : Composition chimique de la sciure de bois.....	55
Tableau 14 : Caractéristique physique de la fleur de chaux « BOUTSIK » .....	56
Tableau 15 : Pourcentage des constituants chimique de la chaux.....	56
Tableau 16 : Caractéristiques physique des RHA.....	61
Tableau 17 : Composition chimique des RHA.....	61
Tableau 18 : Caractéristique physique du sable .....	61
Tableau 19 : Dosage de chaque constituant dans l'essai préliminaire .....	62
Tableau 20 : Résultats des essais préliminaires .....	64
Tableau 21 : Rappel dosage de l'essai prélim 2 .....	65
Tableau 22 : Paramètres de niveau des facteurs.....	65
Tableau 23 : Formule du matériaux par plan d'expérience.....	67
Tableau 24 : Résultats Rc07 et Rf07 .....	67
Tableau 25 : Tableau donnant les coefficients $A_i, A_{ij}$ du modèle Rc07.....	71
Tableau 26 : Tableau donnant les coefficients $A_i, A_{ij}$ du modèle Rf07 .....	72
Tableau 27 : Tableau récapitulatif du calcul de R carré du modèle.....	72
Tableau 28 : Tableau d'estimation des coefficients codés de Rc07.....	73
Tableau 29 : Tableau d'estimation des coefficients codés de Rc07.....	73

Tableau 30 : Masse volumique et Teneur en eau .....	79
Tableau 31 : Cout de 1 m <sup>2</sup> de plaque.....	85
Tableau 32 : Les mesures de prévention et d'atténuation .....	88

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma illustratif d'un matériau composite .....	2
Figure 2 : Classification des matrices .....	3
Figure 3 : Les différents types de renfort de base .....	4
Figure 4 : Modes architecturaux des renforts.....	5
Figure 5 : Bois résineux-Bois feuillus.....	10
Figure 6 : Pourcentages approximatifs pour des bois des zones tempérées.....	11
Figure 7 : Cycle de la chaux.....	16
Figure 8 : Structure du $\text{SiO}_2$ à l'état cristallisé.....	31
Figure 9 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences .....	34
Figure 10 : Vocabulaires de base des plans d'expérience.....	36
Figure 11 : Effet de facteur à étudier.....	38
Figure 12 : Exemple de matrice des effets .....	39
Figure 13 : Surface des réponses.....	43
Figure 14 : Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental .....	44
Figure 15 : Représentation de niveaux du facteur dans un plan factoriel complet .....	44
Figure 16 : Représentation des mélanges à trois constituants sur un triangle équilatéral.....	48
Figure 17 : Plans de mélange et plan d'expériences .....	48
Figure 18 : Processus de fabrication de RHA .....	57
Figure 19 : Processus de fabrication des éprouvettes.....	62
Figure 20 : Rc 7j et Rf 7j des essais préliminaires .....	64
Figure 21 : Matrice des effets.....	66
Figure 22 : Matrice des effets avec ses interactions.....	66
Figure 23 : Résultats Rc07 et Rf07 .....	68
Figure 24 : Droite de Henry des effets normalisé du Rc07 .....	74
Figure 25 : Droite de Henry des effets normalisé du Rf07 .....	74
Figure 26 : Diagramme de PARETO des effets du modèle Rc07.....	74
Figure 27 : Diagramme de PARETO des effets du modèle Rf07 .....	75
Figure 28 : Influence des effets de facteurs.....	75
Figure 29 : Influences des effets d'interaction dans Rc07 .....	76
Figure 30 : Influences des effets d'interaction dans Rf07.....	76
Figure 31 : Iso-réponse en fonction du dosage du Chaux et de l'Eau (RHA=0) .....	77

Figure 32 : Iso-réponse en fonction du dosage du Chaux et de l'Eau (RHA=0.5) .....	77
Figure 33 : Profileur de prévision après optimisation .....	78

## **LISTE DES PHOTOS**

Photo 1 : Tamis de 0.4mm d'ouverture	Photo 2 : Sciure de bois tamisé à 0.4mm d'ouverture	54
Photo 3 : La fleur de chaux « BOUTSIK »		55
Photo 4 : Tamisage de la chaux au tamis 0.4mm		56
Photo 5 ; Incinérateur de balle de riz		57
Photo 6 : Système d'aération		58
Photo 7 : Chargement de balle de riz et allumage		58
Photo 8 : Etape de carbonisation		59
Photo 9 : RHA		59
Photo 10 : Broyeur à boulet		60
Photo 11 : Tamisage de RHA		60
Photo 12 : Malaxage des matières premières		63
Photo 13 : Moule 4×4×16 cm		63
Photo 14 : Eprouvettes moulée		63
Photo 15 : Séchage des éprouvettes		64
Photo 16 : Choix d'un plan dans JMP		69
Photo 17 : Construction de la table de données		69
Photo 18 : Table de données avant et après être remplie		70
Photo 19 : Analyse du plan		70
Photo 20 : Exécution de l'analyse		71
Photo 21 : Test de dureté		80
Photo 22 : Vissage, clouage et sciage		80
Photo 23 : Test au feu		81
Photo 24 : Adhérence aux peintures et vernis		81
Photo 25 : Adhérence au silicate de soude		82
Photo 26 : Adhérence aux enduits de ciment et plâtre		82
Photo 27 : Adhérence aux colles		83
Photo 28 : Pressage avec la presse hydraulique		83
Photo 29 : Echantillon optimisée		84

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1 : DETERMINATIONS DES RESISTANCES MECANIQUES DE ECHANTILLONS A 7 JOURS.....	92
ANNEXE 2 : LES AUTRES ESSAIS PHYSIQUES.....	95

## INTRODUCTION

Dans le cadre de la concrétisation de la politique de développement de notre pays et de la conservation de l'environnement, toutes les actions à mener visent une forte croissance économique basée sur la valorisation des ressources existantes et de la transformation des produits naturels.

De ce fait, la valorisation des sciures de bois provenant des scieries reste un problème non résolu car actuellement s'ils ne sont pas recyclés par de petites moyenne entreprises, ils sont utilisés pour la cuisson des briques cuites. Ce sont des déchets encombrant en plus de la pollution de l'air qu'ils provoquent.

Pourtant ces déchets s'accroissent constamment suivant le temps et l'augmentation de la population. Face à ce problème nous imaginons une valorisation de manière simple avec des produits et des matériels disponibles localement et moins coûteux ; comme la chaux, car en plus d'être moins chers que le ciment, il a des propriétés que le ciment ne possède pas.

Accompagner d'une démarche différente dans la formulation. Si la formulation habituelle consiste à varier un par un les paramètres du mélange et mesurés ses performances, qui est une méthode très longue et les informations recueilli sont incomplètes.

La démarche effectuer est la création d'un modèle expérimentale pour un maximum d'informations précises. Ce modèle est basé sur les plans d'expériences dont le but est de les modéliser mathématiquement afin d'évaluer l'influence de ses paramètres et ses interactions, d'où le thème de la recherche intitulé : « **Formulations et modélisations mathématiques de matériaux composites à base de sciure de bois par plan d'expérience** ».

Le but de ce travail est de créer un matériau composite peu couteux en valorisant les sciures de bois et utilisé des matériaux locaux par la modélisation par plan d'expérience, afin d'obtenir un matériel utilisable.

L'étude comprend 4 parties :

- La première partie sera l'étude bibliographique
- La deuxième va être l'étude expérimentale
- La troisième partie la modélisation par plan d'expérience
- Et la quatrième partie l'approche économique et environnementale

Et enfin, les recherches se terminerons par une conclusion générale.

## **PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES**

# **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX**

## **COMPOSITES [1] [2] [3]**

### **I-1 DEFINITION :**

Un matériau composite est un matériau formé par l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles de natures différents, dont les qualités individuelles se combinent et se complètent permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

### **I-2 CONSTITUANTS :**

Un matériau composite est composé généralement de 3 catégories :

- La matrice : Elle a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.
- Le renfort : Les renforts assurent une part importante de la tenue mécanique (rigidité et résistance) du composite. Ils sont responsables des propriétés mécaniques du matériau composite.
- Les charges et additifs : Ce sont des substances inerte, minérale ou végétale, ajoutées à notre composition de matrice et renfort, permettent de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

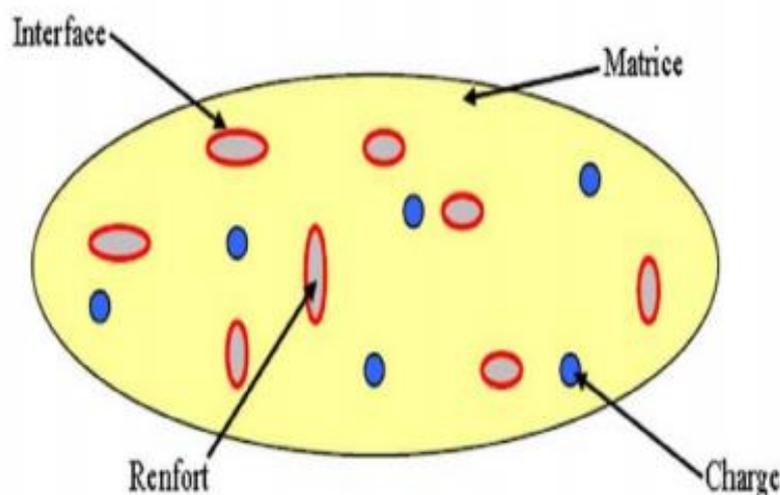


Figure 1 : Schéma illustratif d'un matériau composite

### **I-2-1 La matrice :**

La matrice a pour rôle de lier les fibres renfort, la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques (résistance à la compression), la tenue chimique de la structure, et de donner la forme désirée. Elle est une résine polymère dans un grand nombre de cas et chacune à un domaine particulier d'utilisation.

Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être atteintes.

En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifique élevées.

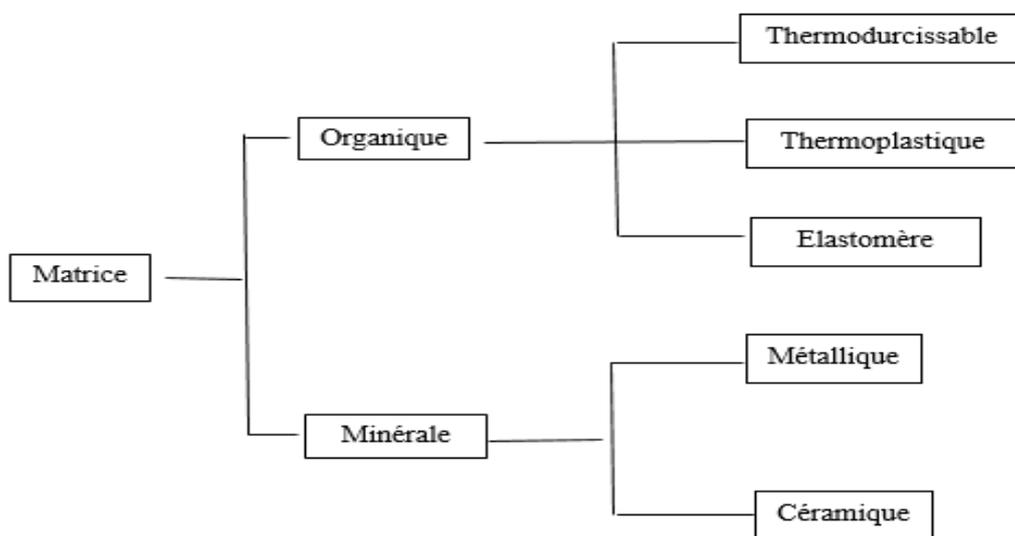


Figure 2 : Classification des matrices

### **I-2-2 Les renforts :**

Dans un matériau composite le renfort est le porteur constitutif principale de la forme ou du volume, ils sont plus dur que la matrice et dont le taux d'utilisation varie selon les composites (on parle du taux massique ou taux volumique).

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes fibre, bille, copeaux, écaille. Mais les renforts sous forme de fibre sont les plus répandus dans les applications industrielles surtout le secteur des transports (automobiles, aéronautiques, navires...) et encore les articles du sport (skis, planches...) grâce à une bonne résistance offerte au matériau, liée à un faible poids.

Son rôle est de donner aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines et une facilité de mise en œuvre avec un faible coût.

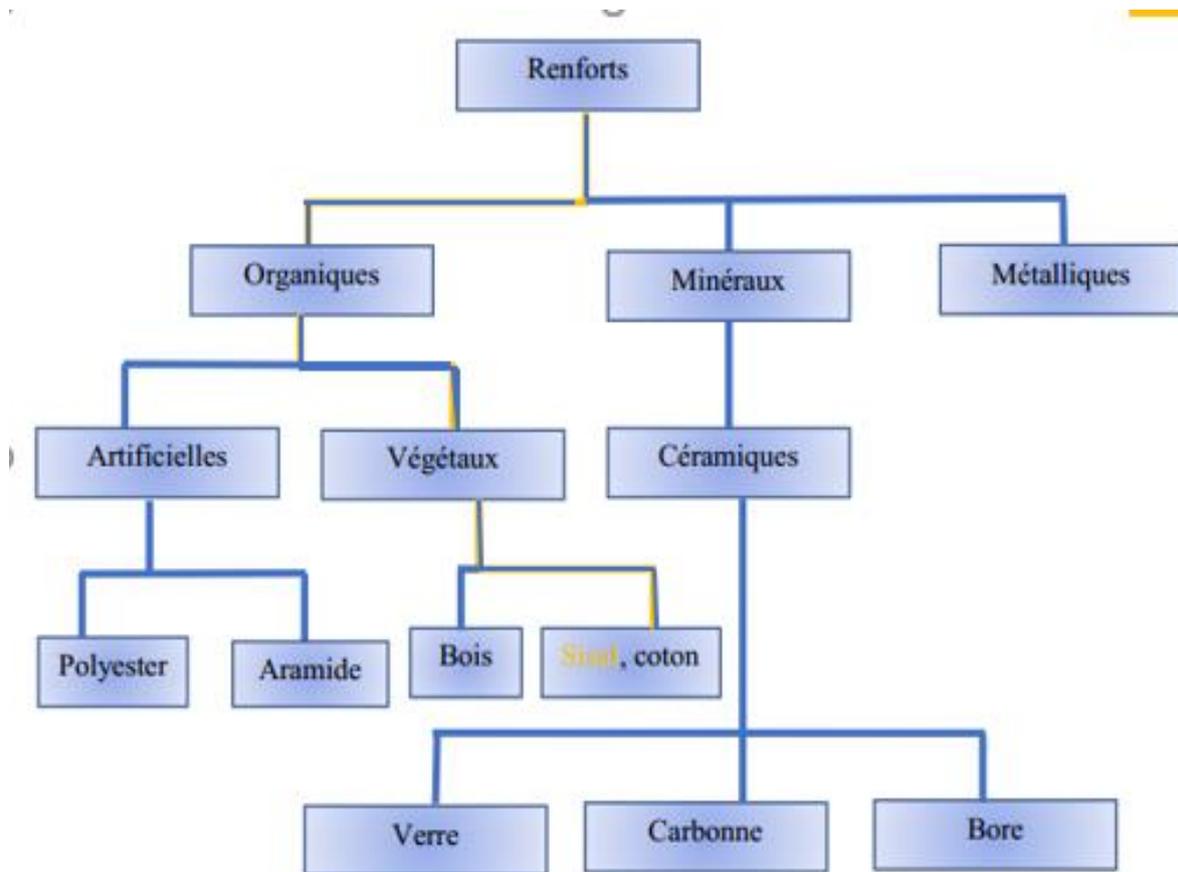


Figure 3 : Les différents types de renfort de base

Les renforts sont constitués par : des fibres courtes et des fibres longues.

#### a) Les fibres courtes :

Elles sont utilisées :

- avec les thermoplastiques (TP) pour les pièces de petite taille moulées par injection et aux caractéristiques mécaniques réduites (cache-culbuteurs, tubulures d'admission, pales de ventilateur...),
- avec les thermodurcissables (TD) pour des températures supérieures à 150° C.

### b) Les fibres longues :

Associées à une matrice polyester (TD), elles sont réservées aux pièces de grande diffusion (skis, planche de surf...). Associées à une matrice époxy, les fibres longues sont réservées aux pièces nécessitant des performances élevées (rampe accès de l'avion de transport militaire A400M, renforts de pont... Ces matériaux sont normalement assemblés pour constituer des macro-matériaux composites, qui sont essentiellement de deux types :

- **Stratifiés** : obtenus par empilement de couches en composite orientées de façon différente ; le comportement mécanique macroscopique doit être conçu ;
- **Sandwich** : panneaux utilisés pour des usages en flexion ; généralement le comportement macroscopique est isotrope dans le plan.

Les structures composites sont anisotropes. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts passant à différentes échelles d'architecture :

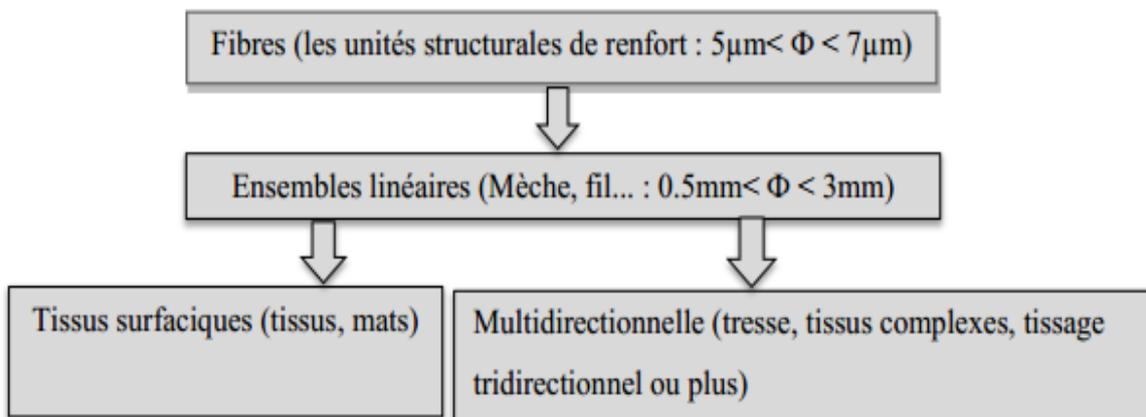


Figure 4 : Modes architecturaux des renforts

### **I-2-3 Les additifs :**

Des additifs sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites. Ils sont ajoutés avec une faible quantité (quelque % en masse), pour améliorer certaines propriétés du composite. Ils peuvent être utilisés comme :

- Catalyseur, accélérateur, durcisseur, qui sont utilisés pour améliorer les réactions chimiques et augmenter le rendement, et favoriser la réticulation des chaînes.
- Stabilisant destinés à retarder, ralentir ou inhiber les processus responsables d'altération de la structure. Par exemples : anti oxygène, anti UV ...
- Pigment et colorant : pigment soluble et insoluble dans la matrice.
- Anti-retrait est utilisé pour éviter la formation des craquelures et le gauchissement de surface.
- Lubrifiant et agent de démoulage : lubrifiant interne et externe
- Autre adjuvant : Antichoc, antistatique, etc.

### **I-2-4 Les charges :**

Tout substance inerte (minérale ou végétale et miscibles ou non dans la matrice) ajoutée à un polymère de base pour lui apporter des modifications de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques. D'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Elles sont réparties dans deux catégories : charges renforçantes, charges non renforçantes.

### **I-3 CLASSIFICATION :**

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- **Les composites à matrices organiques (CMO)** : qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle,
- **Les composites à matrices céramiques (CMC)** : réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins carbone)
- **Les composites à matrices métalliques (CMM).**

Tableau 1 : Quelques exemples de matériaux composites selon leur matrice

<b>TYPE DE COMPOSITE</b>	<b>EXEMPLES</b>	<b>CONSTITUANTS</b>	<b>EXEMPLES D'APPLICATION</b>
<b>Composites à matrice métallique</b>	Aluminium - bore	Matrice aluminium Fibre de bore	Aérospatial
	Aluminium - Carbone	Matrice aluminium Fibre de carbone	
<b>Composites à matrice minérale</b>	Béton	Ciment, sable, gravier	Bâtiment
	Béton armé	Béton, acier	
<b>Composites à matrice organique</b>	Panneaux de particules	Copeaux de bois, résine	Menuiserie, Ebénisterie, Bâtiment
	Panneaux de fibre	Fibres, sciures, farine de bois, résine	

Source : : RANDRIANARINIAINA Rinah « Fabrication de panneau en matériaux composites à base de balle de riz et de résine. »

#### **I-4 MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES :**

Plusieurs types de technologies de mise en œuvre des matériaux composites sont possibles, qui présentent chacun des différences au niveau du procédé jusqu'à leurs utilisations.

Il existe :

- Les technologies dites en moule ouvert : moulage au contact, moulage par projection simultanée
- Les technologies dites en moule fermé : moulage sous vide, moulage par injection basse pression de résine (RTM), moulage à la presse à froid "voie humide" basse pression
- Les technologies pour grandes séries : moulage par injection de compound (BMC), moulage par compression de mat pré imprégné (SMC), moulage par enroulement filamentaire, moulage par centrifugation, moulage par pultrusion, moulage par injection de résine réactive renforcée fibres broyées (R.R.I.M.), moulage par injection de résine réactive renforcée fibres longues (S.R.I.M.)

## **I-5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MATERIAUX COMPOSITES :**

Les qualités principales sont :

- Légèreté : Réduction du poids
- Résistance : Hautes résistances spécifiques (s/r)
- Rigidité : Hautes rigidités spécifiques (E/r)
- Bon comportement à la fatigue : Faible sensibilité à la fatigue, Faible sensibilité à la corrosion, Moins sensible que matériaux métalliques
- Dimensionnement au « juste » besoin : Optimisation empilement / géométrie, Possibilité de concevoir le matériau selon la nécessité.

Les défauts principaux sont :

- Sensibilité aux agents atmosphériques (rayons UV, humidité, température) : humide, vieillissement thermique ...
- Faible tenue au feu
- Coût matériau important : coût matériau + coût procédé
- Forte sensibilité aux trous : zones à fort gradient
- Faible conductivité électrique

## **I-6 UTILISATIONS :**

De plusieurs types de technologies de mise en œuvre des matériaux composites sont possibles.

- Applications navales : Coques sandwich, Coques sandwich
- Applications aéronautiques : Plusieurs parties structurales et aérodynamiques, Freins en carbone et aubes d'hélices et turbines
- Applications aérospatiales : Structures de satellites (différents supports d'antennes) et lanceurs (sandwich Al-C, stratifiés en C et B), Corps de propulseur, Protections thermiques
- Applications sportives : Coques et freins en carbone pour F1 et formule endurance, Vélos de compétition en carbone, Ski, Tennis
- Electricité : Eolienne
- Bâtiment : -Cloisons, Portes, Cellules d'habitation
- Automobile : Carrosserie, Arbre de transmission
- Transport ferroviaire : Wagon.

# **CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MATIERES**

## **PREMIERES**

### **II-1 LA SCIURE DE BOIS :** [4] [5] [6] [7] [8]

Le bois constitue un matériau extrêmement intéressant et complexe dont les caractères sont essentiellement différents de ceux des autres matériaux utilisés dans la construction. Ces différences tiennent à l'origine à la constitution chimique des bois, mais surtout à leur structure fibreuse hétérogène et anisotrope. C'est le premier matériau qui a été utilisé par les hommes qui surent l'employer par empirisme grâce à l'observation de ses propriétés, propriétés qui découlent d'ailleurs de son origine vivante.

#### **II-1-1 Définition :**

En générale, la sciure de bois désigne l'ensemble des résidus et les copeaux de bois provenant par le sciage de bois. Plus précisément, dans la scierie, la sciure de bois est les résidus causés par le sciage de bois carrée ou du dressage des planches dans le but d'obtenir de forme typique bien déterminée. Mais, il y a un autre moyen pour en avoir, grâce à la technologie avancée, des machines particulières vont produire des sciures de bois à la présence de bloc de bois, des branches d'arbres et de copeaux de bois.

#### **II-1-2 Les différents familles du bois :**

Généralement, la sciure de bois a la même propriété interne au bois dans le sciage. Et pour cela, on va voir les propriétés et caractéristiques du bois pour connaître les caractéristiques de sciure de bois.

Il existe 2 familles de bois :

- Les bois de feuillus (bouleau, hêtre et châtaignier, charme, eucalyptus, etc.) à fibres courtes (0,5 à 1,5 mm).
- Les résineux ou les conifères (pins, sapins et épicéas) à fibres longues (3 à 4 mm).

Le bois de feuillus est le terme courant servant à désigner les arbres à larges feuilles (latifoliés), qui font partie de la catégorie des angiospermes, de nombreux feuillus et quelques résineux originaires des régions tropicales sont généralement appelés bois tropicaux ou exotiques, bien que la majeure partie du bois récolté à l'échelle mondiale proviennent de non résineux (58% du volume total).

Le bois de conifère ou résineux est à fibres aréolées qui servent à l'ascension de l'eau dans le bois de printemps et la seconde comporte une ossature issue de la formation des fibres du bois tardif à paroi épaisse, ce qui constitue le bois d'automne. Les conifères sont classés dans la catégorie des gymnospermes.

La distinction entre les deux sortes de bois se fait à la loupe. On fait une coupe à l'axe. Si le bois paraît former une masse pleine, c'est du bois conifère ; et s'il présente des trous qui peuvent être de véritables vaisseaux, alors ils appartiennent à la classe du bois feuillu.

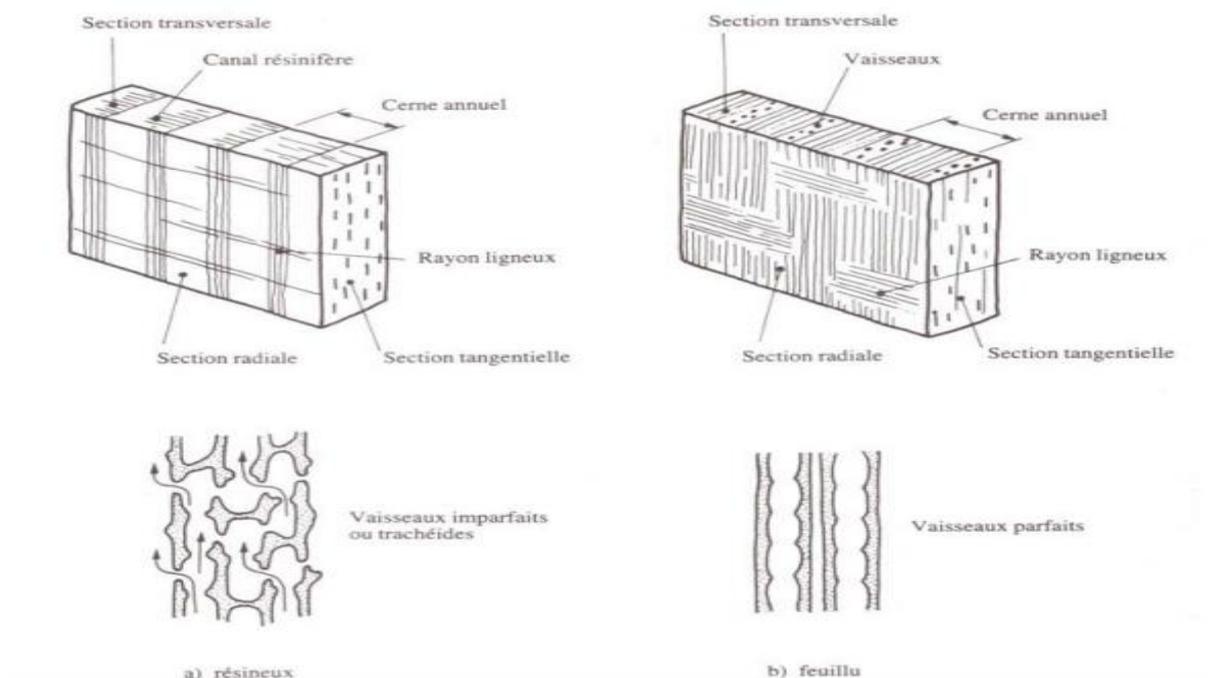


Figure 5 : Bois résineux-Bois feuillu

## II-1-3 Propriétés chimiques du bois :

### a) Composition élémentaire du bois :

La composition chimique élémentaire du bois est variable suivant les espèces. Mais on peut envisager qu'à l'état anhydre, le bois est composé d'environ :

- 50 % de carbone,
- 42 % d'oxygène,
- 6 % d'hydrogène,
- 1 % d'azote
- 1 % de minéraux (principalement Ca, K, Na, Mg, Fe, Mn).

On trouve également, dans cette proportion minérale, du soufre, du chlore, du silicium, du phosphore, et d'autres éléments à l'état de trace.

**b) Composition moléculaire :**

Le bois est constitué principalement de matières organiques (cellulose et lignine) et d'un faible pourcentage (de 1 à 1,5 %) d'éléments minéraux. Il contient également une part d'humidité variable.

On peut les distinguer par deux catégories. La première catégorie renferme les constituants qui forment quantitativement la partie majoritaire de la substance originelle. Et on les désigne sous le terme de « constituants communs » pour tenir compte du fait qu'on les a rencontrés dans toutes les espèces de bois, tantôt sous celui de « constituants cellulaires » pour exprimer qu'en réalité, ils forment seuls la paroi de la cellule ligneuse. Ce sont :

- Cellulose (environ 50 %)
- Lignine (20 à 30 %)
- Hémicellulose (15 à 25 %)
- Autres substances organiques : polysaccharides, pentosanes, hexosanes, résines, tannins, colorants, cires, alcaloïdes, etc.

La deuxième catégorie concerne les constituants les plus divers mais moins abondants et moins fréquents et est dénommée « constituants secondaires ou constituants particuliers ou bien corps étrangers ». Les constituants les plus remarquables de cette catégorie sont : les matières colorantes naturelles, les résines, huiles essentielles et oléorésines, les cires, matières grasses, les sucres, hydrates de carbone, les substances azotées, les matières minérales, les acides organiques libres...

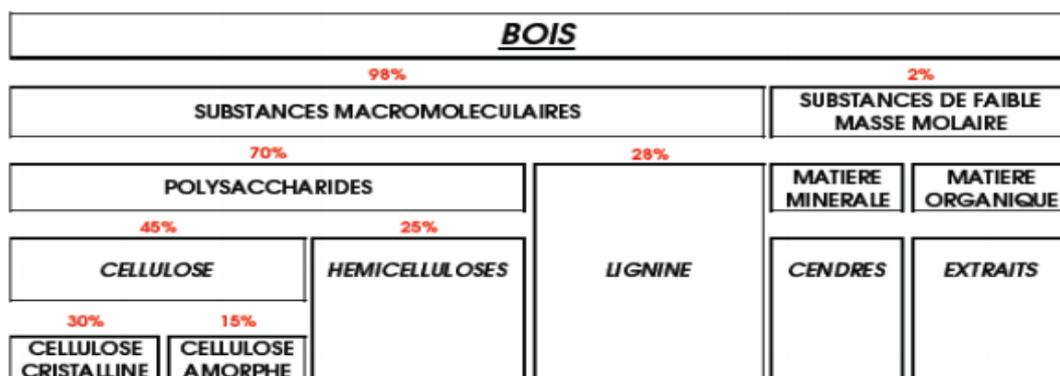


Figure 6 : Pourcentages approximatifs pour des bois des zones tempérées

## **II-1-4 Caractéristiques physiques du bois :**

### **a) La densité :**

La densité du bois varie en fonction de la teneur en eau. Pour mesurer cette densité, il faut peser soigneusement un échantillon de volume connu et en établir le rapport. La densité d'un bois est le rapport de la masse au volume mesuré au même état d'humidité par rapport à la référence. On prend l'eau comme référence pour tout le cas d'un solide ou d'un liquide, qui a une masse volumique égale à 1kg/ dm<sup>3</sup> ou 1g/cm<sup>3</sup>

$$D_H = \frac{M_H}{V_H} \times \frac{V_E}{M_E}$$

Où  $M_H$  : la masse de l'échantillon en g

$V_H$  : le volume de l'échantillon en cm<sup>3</sup>

$M_E$  : la masse de référence : l'eau

$V_E$  : le volume de référence : l'eau

Quelques densités :

- Sapin :  $0,4 \leq d \leq 0,5$
- Pin divers :  $0,5 \leq d \leq 0,8$
- Bois fruitiers :  $0,7 \leq d \leq 0,8$
- Mimosa :  $0,7 \leq d \leq 0,8$
- Palissandre divers (Brésil, Inde, Madagascar) :  $d > 1$ .

La densité réelle de la matière ligneuse constitutive des parois cellulaires du bois est sensiblement constante pour toutes les essences et égale à 1,530 environ.

### **b) L'humidité du bois :**

Au moment de l'abattage, la teneur en eau dans le bois est de 40% en moyenne. Cette teneur varie suivant le temps. Aussitôt après l'abattage, le bois perd progressivement la quantité d'eau qu'il contient. On distingue :

- L'eau libre ou intracellulaire qui remplit les vaisseaux et les vides cellulaires
- L'eau de constitution de la cellulose et de la lignine qui entre dans la composition des membranes
- L'eau de saturation ou eau d'imprégnation qui est l'eau retenue par les parois des cellules. Cette dernière influe directement sur les propriétés des bois.

La teneur en eau ou l'humidité du bois sec se détermine suivant les prescriptions de la norme AFNOR B 51 - 004.

La teneur en humidité est déterminée par le rapport entre le poids d'eau obtenu et le poids du bois sec mesuré fois 100. Elle est définie par la formule suivante :

$$H\% = \frac{\text{Poids d'eau}}{\text{Poids du bois sec}} \times 100 \qquad H\% = \frac{M_H - M_S}{M_H} \times 100$$

Où : H%= taux d'humidité en pourcent

$M_S$  = masse sèche

$M_H$  =masse humide

On dit que le bois est :

- Saturé si H% varie de 25 à 35 suivant les espèces
- Mi-sec si H% varie de 23 à 30%
- Commercialement sec si H% varie de 18 à 23%
- Sec à l'air si H% varie de 15 à 20%
- Desséché si H% est au-dessous de 13%. C'est très souvent le cas du bois séjournant dans les locaux d'habitation ou des bureaux fortement chauffés et non humidifié artificiellement
- Anhydre ou sec absolu si H% est de 0%, qui ne peut être obtenu que par un séjour en étuve de 100° à 116° et même à 130° et, qui ne peut être maintenu puisque le bois absorbera l'humidité ambiante assez lentement jusqu'à l'état d'équilibre.

#### c) **Coefficient de dilatation :**

Presque tout le corps, sous l'action de la chaleur, va subir une transformation dimensionnelle c'est-à-dire comme le bois se dilate sous l'action de la chaleur et se contracte par refroidissement.

#### d) **Hygroscopie du bois :**

C'est l'aptitude du bois à absorber l'humidité de l'air. Elle dépend de l'essence, du lieu et des conditions de croissance, de la partie de l'arbre concernée, du taux hygrométrique et de la température de l'air ambiant. Toutes les essences ont une variation de leur hygroscopicité selon le milieu ambiant. Ce taux doit être le plus proche possible de celui du milieu dans lequel l'ouvrage sera mis en place lors de l'usinage.

**e) La conductibilité :**

C'est l'aptitude du bois à transmettre la chaleur, le son et l'électricité. Il y a la conductibilité thermique, phonique et électrique. Elles dépendent de l'essence, du taux d'humidité de la structure cellulaire. Caractéristique utile dans l'emploi du matériau pour l'isolation acoustique.

**f) La combustibilité :**

C'est l'aptitude du bois à brûler. Elle dépend de la teneur en eau, de la partie de l'arbre, des dimensions et de la densité. Le pouvoir calorifique du bois augmente avec la densité. Le bois s'enflamme vers 270°C.

**g) Durée de vie du bois :**

Sa durée de vie dépend beaucoup des paramètres d'un milieu que l'on entoure par exemple l'environnement (à air sec, à sol humide, à air humide, alternance de sec et humide). Le bois fortement minéralisé résiste mieux. Après observation, on constate que le bois atteint une durée de vie jusqu'à un demi-siècle à l'air sec.

## **II-2 LA CHAUX :**

Connu et utilisé depuis l'antiquité dans l'habitat et la construction, surtout pendant la période gréco-romaine, les premiers mortiers à base de chaux, de sable fin et d'additions pouzzolaniques (cendres volcaniques) permettent la construction des murs. La chaux à vue depuis le 19<sup>e</sup> siècle son influence régressé. Elle a été remplacée souvent par le ciment, matériaux dont la solidité, l'efficacité, la rapidité de prise ont le développement accélérer.

### **II-2-1 Définition :** [9] [10]

La chaux est un corps chimique minéral, l'oxyde de calcium de formule brute CaO. Mais le terme désigne surtout une matière sèche alcaline ou fortement basique, facilement poudreuse et hydrophile, de couleur blanche ou blanchâtre, obtenue par calcination du calcaire, obtenue autrefois artisanalement dans un four à chaux, puis industriellement dans divers fours modernes.

La chaux se définit comme la variété physique ou chimique sous laquelle se présente l'oxyde de calcium, soit à l'état d'oxyde plus ou moins pure (CaO), soit sous forme d'hydroxyde de calcium [Ca(OH)<sub>2</sub>] obtenue après hydratation de l'oxyde de calcium.

### **II-2-2 Processus de fabrication de la chaux :** [11]

Pour découvrir les chaux naturelles nous allons les suivre dans leur cycle. Nous verrons comment on passe de la pierre à la chaux vive puis à la chaux éteinte qui retournera dans le mortier à son état initial de pierre.

- LA PIERRE, calcaire pur ou argileux, détermine la prise, aérienne ou hydraulique de la chaux.
- LA CUISSON à 900°C entraîne une perte de masse 45% transforme la pierre en chaux vive et du gaz carbonique.
- LA CHAUX VIVE est broyée à la sortie du four. Elle s'utilise en l'état pour certains travaux ou sera éteinte.
- L'EXTINCTION sans excès d'eau transforme la chaux en poudre. Mise en sac elle sera vendue sous le nom de chaux aérienne ou de chaux hydraulique. Eteinte par immersion, seule la chaux aérienne peut se conserver en pâte.
- LES CHAUX ÉTEINTES répondent à des NORMES qui permettent de savoir si la chaux est calcique ou magnésienne, aérienne ou hydraulique, de résistance faible ou forte, pure ou bâtarde.

En résumé, le cycle de la chaux est le passage du calcaire à la chaux vive  $\text{CaO}$  par calcination, ensuite de la chaux vive à de la chaux éteinte  $\text{Ca(OH)}_2$  par un processus d'extinction. En fin la chaux éteinte pour former le  $\text{CaCO}_3$  par l'attaque de gaz carbonique.

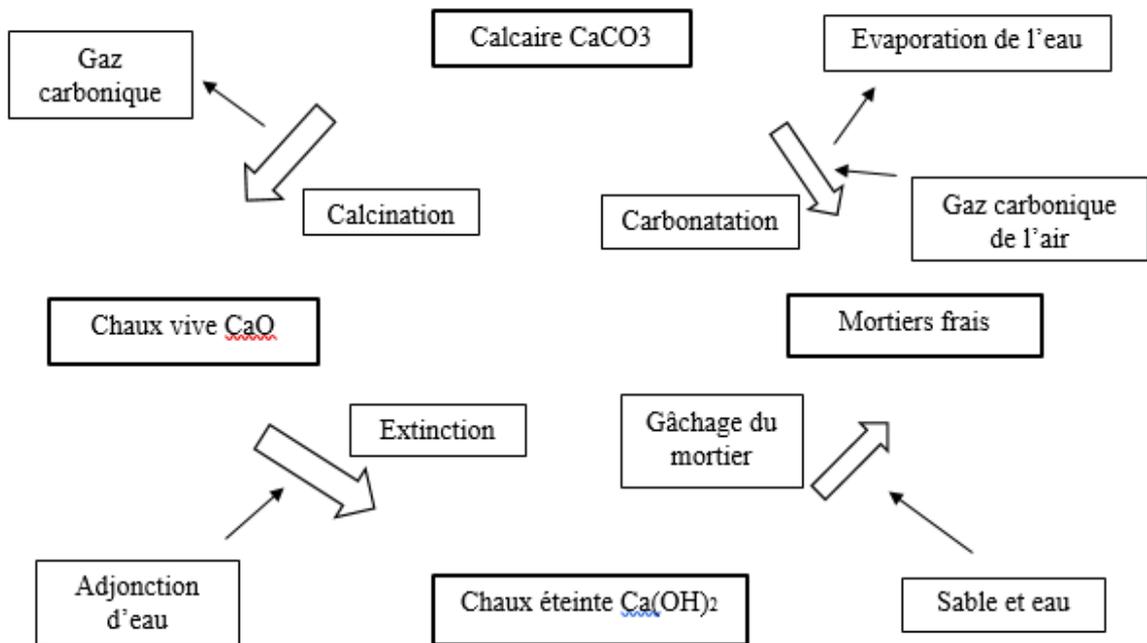


Figure 7 : Cycle de la chaux

### II-2-3 Classification de la chaux : [9] [10] [11]

La chaux se classifie en 2 types distinct :

- les chaux aériennes : dont la propriété est de durcir à l'air mais non à l'eau
- les chaux hydraulique : qui ont la possibilité de durcir non seulement à l'air mais aussi sous l'eau

#### a) Chaux aérienne :

La chaux aérienne s'obtient à partir de roches calcaires contenant au plus 10% d'impuretés argileuses.

Elle est obtenue aussi par la cuisson entre  $850^\circ\text{C}$  et  $1000^\circ\text{C}$  de roche calcaire pure ou de coquillages marins. Les chaux aériennes se répartissent en : chaux grasses, obtenues à partir de calcaires très purs ou contenant de 0,1 à 1% d'argile, chaux maigres, obtenues à partir de calcaires contenant de 2 à 8 % d'argile. Le phénomène de cristallisation s'opère en présence d'air, s'effectue par carbonatation, c'est-à-dire en absorbant le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) présent dans l'atmosphère.

La chaux « vive » obtenue par « calcination » est « éteinte » par adjonction d'eau. « La chaux hydratée » ou « La chaux aérienne ». La chaux hydratée ne peut faire prise qu'au contact de l'air, en réagissant avec le gaz carbonique ambiant (d'où son nom de « chaux aérienne »). La chaux vive est simplement la chaux sortie du four à chaux. Elle prend l'apparence de pierres pulvérulentes en surface. Traditionnellement, le principal constituant de la chaux vive est l'oxyde de calcium, qui a pour formule CaO que l'on obtenait avec des calcaires très purs, voir des marbres.

La chaux grasse/chaux maigre est venue de ce que les chaux maigres augmentent peu de volume lorsqu'on les réduit à l'état de pâte tandis que les chaux grasses donnent un volume plus important, on dit qu'elles foisonnent beaucoup plus. Pendant longtemps on a appelé « chaux maigres » celles qui avaient la propriété de durcir dans l'eau et « chaux grasses » celles qui n'avaient pas cette propriété. La distinction, chaux aérienne/chaux hydraulique est venue du fait que certaines chaux maigres ne sont pas hydrauliques.

On appelle donc chaux grasse, celle qui donne un foisonnement considérable, chaux maigre, celle qui foisonne peu et qui ne durcit pas dans l'eau et chaux hydraulique, celle qui a la propriété de durcir dans l'eau. On donnait aussi assez souvent le nom de chaux commune à la première de ces chaux.

#### **b) Chaux hydraulique :**

La chaux hydraulique provient d'un calcaire moyennement siliceux qui fait prise par réaction à l'eau, elle s'obtient à partir de roches calcaires contenant 10% à 20% d'impuretés argileuses (calcaires marneux) ; cuite à 1200°C, l'influence des impuretés contenus dans la roche mère donne à la chaux ces propriétés hydraulique.

Au cours de la cuisson du calcaire marneux certaines molécules CaO se joignent avec les oxydes SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, contenus dans les minéraux d'argiles en formant les silicates CaO.SiO<sub>2</sub>, les aluminates CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et les ferrites CaO.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de calcium, qui durcissent à l'air comme dans l'eau. Le reste de molécules CaO s'éteint comme pour la chaux aérienne. En conséquence plus la quantité de CaO est grande, la chaux est moins apte de durcir sous l'eau.

Pour caractériser la capacité du durcissement hydraulique (sous l'eau) du liant on utilise habituellement le module hydraulique :

$$m = \frac{\%CaO}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)}$$

Selon la valeur de m les liants sont classés comme suit :

$1,7 \leq m \leq 9$  : Chaux hydraulique.

$1,1 \leq m \leq 1,7$  : Ciment romain.

$m \geq 9$  : Chaux aérienne.

La chaux hydraulique gâchée à l'eau, après durcissement à l'eau continue à durcir à l'air par carbonatation des molécules  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sous l'action du  $\text{CO}_2$  qui s'infiltré dans la masse après évaporation de l'eau de gâchage.

Plus la chaux hydraulique est fine plus la prise et le durcissement sont accélérés et plus la résistance est élevée. Les chaux hydrauliques sèchent au contact de l'eau. Elles conviennent ainsi aux soubassements, aux murs humides car elles absorbent une partie de l'humidité lors de leur prise.

Quoique plus rapide que celle de la chaux aérienne, la prise des chaux hydrauliques n'en demeure pas moins longue dans le temps. C'est après plusieurs mois qu'elles acquièrent leur résistance mécanique définitive.

Tableau 2 : Critère d'hydraulicité

Type de chaux	Argile %	Indice d'hydraulicité	Durée de prise
Chaux grasse	0 – 10	0 – 0,1	6 mois
Faiblement hydraulique	10 – 18	0,1 – 0,30	15 à 30 jours
Moyennement hydraulique	18 – 25	0,30 – 0,40	2 à 4 jours
Chaux hydraulique	25 - 70	0,40 – 0,50	2 jours

Source : Auteur

#### **II-2-4 Caractéristique de la chaux :**

Les caractéristiques physiques des différents types de chaux sont illustrées dans le tableau suivant.

**Tableau 3 : Caractéristique physique des différents types de chaux**

Caractéristique physique	Chaux aérienne		Chaux hydraulique
	Chaux grasse	Chaux maigre	
Indice d'hydraulicité	0 – 0,10	0,10 – 0,30	0,40 – 0,50
Poids spécifique [t/m <sup>3</sup> ]	2,20 – 2,30	2,30 – 2,50	2,60 – 2,90
Densité apparente	0,50 – 0,70	0,60 – 0,90	0,7 – 1
Surface spécifique de Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	8000 - 12000	5000 - 9000	3000 - 8000

Source : Auteur

Le rendement " $\eta$ " est le Volume de chaux en pâte pour 1 Kg de chaux vive.

La chaux est dite "pure" si la chaux vive CaO > 97%

La chaux est grasse si  $\eta \geq 2,5$ . La chaux vive CaO > 85%

La chaux est maigre si  $\eta$  se situe entre 1,5 et 2,5. La chaux vive CaO < 85%

La chaux est inutilisable si le rendement est  $\eta < 1,5$ .

### **II-2-5 Les propriétés de la chaux :**

La chaux est un matériau alcalin qui réagit avec les acides pour former des sels de calcium.

Elle absorbe les gaz acides, comme le dioxyde de soufre et le gaz carbonique.

Elle réagit sous certaines conditions avec la silice ou les silicates naturels. Ainsi, la réaction avec la silice sous pression permet de fabriquer des briques de silicate de calcium ; la réaction avec les matériaux argileux est utilisée pour la stabilisation des sols.

La chaux réagit chimiquement sous haute température avec les impuretés des métaux et sert au raffinage de ces métaux.

Grâce à la finesse et à la forme des particules de la chaux hydratée, la pâte de chaux est plastique et constitue avec du sable des mortiers et enduits très plastiques dont la solidité augmente avec le temps par décarbonations.

Grâce à son alcalinité et à ses réactions avec les sols, la chaux permet de corriger l'acidité des sols et constitue un fertilisant important.

### **II-2-6 Les avantages de la chaux :**

La microporosité de la chaux permet la fabrication d'un mortier perméable à la vapeur d'eau.

Elle permet donc d'éviter les condensations, d'expulser l'humidité. Elle génère ainsi une nette amélioration du confort intérieur.

Elle est imperméable à l'eau de ruissellement et protège le gros œuvre des intempéries.

Associée à d'autres matériaux (chanvre) elle a des vertus isolantes, aussi bien phoniques que thermiques.

Elle assainit les supports grâce à ses vertus bactéricides.

Ses remarquables qualités de souplesse et d'élasticité lui permettent de s'adapter parfaitement à de multiples supports, limitant considérablement les fissures dans les enduits.

La chaux donne sur le plan décoratif un cachet sans égal à un mur ou une façade. Elle se patine et vieillit extrêmement bien.

Elle est écologique et naturelle. Elle a aussi un pouvoir assainissant et désinfectant ; une participation à la respiration de l'ouvrage ; une élasticité ; une tenue dans le temps encore inégalée (les ruines romaines) ; une absorption de CO<sub>2</sub> lors de sa carbonatation ; un excellent comportement au feu.

### **II-2-7 Utilisation :**

Grâce à ces avantages et propriétés spécifiques, la chaux est utilisée dans divers secteurs comme l'agriculture, la construction routière, le bâtiment, l'industrie...

- Utilisation en agriculture : les plantes ont leur meilleur développement sur un sol dont le pH est compris entre 6,5 et 7,5. La chaux est utilisée depuis des siècles sur les sols acides, naturellement argileux ou sableux, ou encore devenus acides du fait de l'emploi excessif d'engrais chimiques ou organiques.
- Stabilisation de sols : la chaux vive est utilisée pour les travaux de fortifications. La chaux vive déshydrate fortement le sol et réagit avec les argiles, contribuant ainsi à stabiliser les sols. Aujourd'hui, la chaux est employée en mélange avec des revêtements bitumineux sur les routes.

- Traitement des eaux : L'ajustement du potentiel hydrogène ou pH, l'éventuel précipitation d'hydroxydes métalliques, la capacité d'agglomération de certains matériaux par « floculation », voire la décarbonatation par précipitation de  $\text{CaCO}_3$  ou la destruction des germes, justifient son emploi dans le traitement des eaux, le plus souvent sous forme de chaux vive. Dans le traitement des eaux usées et des effluents, un ajout de chaux neutralise l'acidité et stabilise les boues. Dans les incinérateurs, elle est utilisée pour neutraliser les fumées acides chargées en dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et/ou en acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ).
- Traitements des fumées : Il existe différents procédés pour neutraliser ces émissions de gaz acides : lit fluidisé, ou la chaux et ajoutée au produit avant incinération. Voie sèche, ou les gaz acides sont piégés par la chaux dans un réacteur. Voie semi-sèche, selon le même principe, mais avec un lait de chaux. Voie humide, les gaz passent à travers un rideau d'eau. Cette dernière est ensuite neutralisée à la chaux.
- Utilisation dans l'alimentation : La chaux a été utilisée pour la conservation d'aliments comme les œufs. La chaux est utilisée dans le trempage du maïs avant cuisson afin de ramollir ses téguments et d'en augmenter la teneur en calcium.
- Utilisation dans le bâtiment :

Construction : La chaux aérienne est principalement employée pour les enduits et la décoration, la chaux hydraulique lui est préférée pour l'édification de murs en pierres ou en moellons, réalisation de sous-bassement, dalles, etc. Enduits et décoration : Hormis les bétons, la chaux accepte tout type de support : Terre, pierre, brique, bois.... Elle a la particularité d'être perméable à l'air et imperméable à l'eau évitant ainsi la condensation. Les mortiers de chaux sont employés indifféremment en extérieur ou à l'intérieur sont utilisés pour le rejointoiement et les enduits des constructions neuves ou en restauration. Ils sont en outre relativement souples et évitent les micros fissures qui favorisent le passage de l'eau vers l'intérieur des murs.

- Utilisation dans l'industrie :

Papier : La chaux est un agent de blanchiment dans la pâte à papier.

Traitement des métaux : La chaux est utilisée pour purifier la bauxite lors de la fabrication de l'aluminium. Elle est également employée pour la production de Zinc, Cuivre, Plomb, Or,

Argent, Uranium de par son aptitude à séparer les sels métalliques et autres impuretés du minerai.

Industrie sucrière : La chaux y joue un rôle important : elle permet de séparer les impuretés du sucre contenu dans le jus extrait de la betterave et de la canne.

Industrie Pharmaceutique : La chaux est utilisée dans la fabrication des dentifrices pour son apport en calcium mais également pour ses propriétés désinfectantes et cicatrisantes. Elle entre également dans la composition de nombreux médicaments.

#### **II-2-8 Les gisements de calcaire à Madagascar : [12]**

Il existe un peu partout dans l'île des différents gisements de calcaire mais leur exploitabilité n'est pas encore bien étudiée et les tonnages exacts de ces gisements ne sont pas encore bien connus.

- Antsiranana : réserve de grande pureté autour de la baie de Diego
- Mahajanga : gisement dolomitique sauf à Marohogo, Amboanio gisement exploité par SANGA
- Tuléar : gisement inépuisable
- Antsirabe : gros gisement fortement dolomitique dans la région de Sahatany-Ambatofinandrahana. A Ibity un bon gisement estimé à  $10^7$  m<sup>3</sup>, exploité par CHAUMAD et HOLCIM
- Ambatondrazaka-Moramanga : réserve constituée par de petits gisements dispersés

### **II-3 LES CENDRES DE BALLE DE RIZ :** [9] [11] [13]

Chaque année, plus de 700 millions de tonnes de riz sont récoltées dans le monde, suivant les chiffres de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture), et l'élimination de la balle de riz est un défi environnemental. La balle de riz est souvent brûlée pour produire de l'électricité et réduire la quantité de déchets mis en décharge.

Selon les estimations bibliographiques, pour une tonne de balle de riz, la combustion complète des balles de riz donne environ 200 Kg de cendres.

Dans le contexte malgache nous produisons par an environ 4.000.000 de tonnes de riz, donc théoriquement on peut obtenir 220.000 tonnes de cendres de balle de riz.

Nous tenons à signaler que les balles de riz sont des déchets agricoles qui se trouvent en grande quantité à Madagascar et en particulier à Ambatondrazaka et à Marovoay Mahajanga.

#### **II-3-1 Définition :**

La cendre de balles de riz est le produit obtenu après la combustion des balles de riz.

La balle de riz est constituée par un squelette siliceux des cellules végétales qui contiennent des pores microscopiques plus nombreux que ceux des frustules des diatomées. Il faut remarquer que la silice est très abondante dans la balle de riz, plus de la moitié en proportion.

La cendre de balle de riz, obtenue par calcination, est un produit actif contenant de la silice.

La silice a pour formule général  $\text{SiO}_2$  et elle existe sous 2 états différents :

Etat hydraté  $\text{SiO}_2$  : Cristallisé

Amorphe

Etat anhydre  $\text{SiO}_2$  ; n  $\text{H}_2\text{O}$  avec n variable (entre 3 et 4)

La silice active est l'élément essentiel utilisé pour fabriquer des briques en terre ou mortier.

#### **II-3-2 Obtention des cendres de balles de riz :**

Par calcination des balles de riz de température environ  $700^\circ\text{C}$ , on obtient une cendre grisâtre qui est un produit particulièrement riche en silice de l'ordre de 84 à 97 % et on constate que c'est une excellente pouzzolane artificielle. Les cendres d'écorces de riz (CBR) peuvent alors devenir un matériau cimentaire pouzzolanique.

Les cendres ont été obtenues par calcination de la balle de riz dans un four à moufle de marque Thermo Scientific. La balle de riz a été au préalable broyée finement (<0,5 mm) à l'aide du broyeur susmentionné. La poudre obtenue a été initialement incinérée par élévation graduelle de la température de 105 à 550 °C jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de fumée. Après l'incinération, la matière restante a été calcinée dans le four à une température constante (650 °C) pendant 4 heures jusqu'à l'obtention de cendres de couleur grise. La teneur en cendres de la balle de riz représente le rapport entre la masse de cendres et la masse de balle de riz fraîche.

Si la combustion de balle de riz se fait à l'air libre, le temps de calcination était plus long (2 jours).

Pour conclure, la silice obtenue dans la cendre de balle de riz est une silice amorphe donc on peut dire que les cendres de balles de riz sont disponibles localement, riches en silice, et presque gratuites.

### **II-3-3 Types :**

On peut distinguer deux types de cendres : la RHA « Rice Husk Ash » ou cendre de balle de riz et la CRH « Carbonized Rice Husk » ou balle de riz carbonisée.

#### **a) La RHA ou Rice Husk Ash :**

La RHA s'obtient au travers d'une combustion contrôlée et complète des coques de riz dans une chaudière à haute température (de l'ordre de 600°C). Elle possède de bonnes propriétés pouzzolaniques.

- **Taux de RHA**

La RHA est un produit très riche en silice, sa teneur en silice peut atteindre 80 à 97,3% (en masse) qui est le plus important en comparaison des autres matériaux pouzzolaniques. Cette teneur en silice dépend de la température de combustion et de la bonne maîtrise de la combustion. Elles possèdent une teneur élevée en silice, d'autant plus élevée que la combustion est complète et qu'elle se fait à haute température (de l'ordre de 600°C).

Tableau 4 : Composition chimique des cendres de balle de riz RHA

Oxydes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO et MgO
En % pondéral	84 %	0,56 %	0,36 %	4.10 <sup>-4</sup> %	34.10 <sup>-4</sup> %	-

Source : RABETANETY Léon Patrick, «\_Etude et essai de fabrication de peinture minéral par le procédé de géopolymérisation\_»

### **b) La CRH ou Carbonized rice Husk :**

La CRH est obtenue par une combustion non contrôlée de balles de riz. Elle se présente sous la forme de « cristallite » et possède de faibles propriétés pouzzolaniques. Par conséquent, ce type de cendre est moins intéressant.

La cendre CRH renferme de silice cristalline qui est connue pour poser des problèmes de santé puisqu'elle est à l'origine de la silicose.

### **II-3-4 Caractéristique de la silice :**

La silice ou l'anhydride silicique ou encore oxyde de silicium est la combinaison chimique de l'atome de silicium (numéro atomique 14 ; masse atomique 28,086; densité 2,35 ; de couleur brune à l'état amorphe et gris de plomb à l'état cristallisé) avec de l'oxygène (numéro atomique 8 ; masse atomique 14).

La silice est constituée d'un réseau tridimensionnel d'atomes de silicium dans un environnement tétraédrique liés entre eux par des ponts de type Siloxane (Si–O–Si) avec en surface des groupements hydroxyles appelés Silanols Si – OH.

On la retrouve en tant que matériaux de structure pour améliorer les propriétés mécaniques, en tant que support de catalyseurs, comme agent de séparation en chromatographie ou encore comme matériau fonctionnalisé lorsque les Silanols de surface réagissent avec une molécule donnée, en particulier pour des applications biologiques.

### **a) Les états de la silice :**

La silice se présente sous différents états. Elle peut être sous forme de sable quartzeux, de grès quartzeux, de quartzites, de quartz filoniens, ou encore de galets siliceux et silex.

- Etat anhydrique SiO<sub>2</sub> : cristallisé avec 3 variétés polymorphiques :
  - Quartz de densité 2,65 ;
  - Tridymite de densité 2,66 ;
  - Cristobalite de densité 2,10 à 2,20
- La silice amorphe : le verre de silice

Etat hydraté SiO<sub>2</sub> nH<sub>2</sub>O ; n généralement égal à 3 ou 4.

### **II-3-5 Les propriétés particulières de la silice :**

#### **a) Propriété thermique :**

C'est la silice qui a la plus faible valeur de coefficient de dilatation thermique de tous les corps connus.

Son allongement est de 0,55mm/m pour une variation de température entre 20°C et 1000°C. Elle résiste bien au choc thermique, qui est supérieure aux autres produits réfractaires.

Sa chaleur massique et sa conductivité thermique varient de façon croissante avec la température.

Tableau 5 : La chaleur massique de la silice

<b>Température (°C)</b>	<b>Chaleur massique (kcal/kg.°C)</b>
100	0,1850
200	0,2006
250	0,2068
400	0,2229
600	0,2385
800	0,2506
1000	0,2584
1200	0,2621
1400	0,2691
1600	0,2777
1700	0,2810

Source : RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie « Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux »

**Tableau 6 : Conductivité thermique de la silice**

Conductivité thermique de la silice						
Fondue		Transparente			Opaque	
T (°C)	$\lambda$ (cal/cms°C)	T (°C)	$\lambda$ (cal/cms°C)	$\lambda$ (kcal/mh°C)	$\lambda$ (cal/cms°C)	$\lambda$ (kcal/mh°C)
104	0,0041	20	0,0330	1,1900	0,0026	0,9350
214	0,0046	100	0,0035	1,2600	-	-
398	0,0060	200	0,0037	1,2250	-	-
488	0,0084	300	0,0040	1,4400	-	-
691	0,0131	400	0,0044	1,5850	-	-
819	0,0185	950	0,0640	2,3100	-	-
		0-100			0,0033	1,1900

Source : RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie « Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux »

**b) Propriété physique et mécanique :**

La silice constitue un bon isolant électrique même à une température élevée et dans une atmosphère humide. C'est la silice qui a la plus faible valeur de coefficient de dilatation thermique de tous les corps connus.

La silice permet de diminuer le retrait de la matière kaolinique présente dans les pâtes. Son efficacité ne dépend pas uniquement de sa proportion dans les pâtes mais aussi de la :

- Grosseur de ses grains :
  - Les grains grossiers, à action plus accentuée, facilitent et accélèrent le séchage ;
  - Les grains fins, uniformément repartis dans les pâtes, freinent le retrait
- Densité :
  - Pour la silice opaque = 2,07 à 2,10
  - Pour la silice transparente (obtenue par la fusion du cristal de roche) = 2,15 à 2,21 ;

- Dureté à l'échelle de MOHS :

La silice raye les métaux (aciers) et les verres.

- Pour la silice opaque = 4,9 à 6 ;

- Pour la silice transparente = 7.

- Résistance à la compression = environ 2500 bars (250 MPa)

#### c) Propriété chimique :

En général la silice n'est pas attaquée par les acides, sauf par l'acide fluorhydrique et l'acide phosphorique au-dessus de 400°C.

En plus, le cuivre pur et l'argent pur n'ont aucun effet sur la silice. Par contre le nickel la réduit à la température de 1200 °C et elle ne reste pas intacte avec les oxydes métalliques.

#### d) Propriété pouzzolanique :

Les pouzzolanes ont été définies comme étant un matériau capable de réagir avec de la chaux, en présence d'eau et de former des composés identiques à ceux d'un liant.

La formation chimique d'une réaction pouzzolanique est :



SiO<sub>2</sub>CaO, n H<sub>2</sub>O silicate de calcium hydraté.

Vu la quantité de silice dans les cendres de balle de paddy, on peut affirmer que c'est une excellente pouzzolane artificielle.

#### II-3-6 Utilisation des cendres de balle de riz :

- On peut utiliser la cendre de balles de riz comme liant en substitution au ciment. Le ciment a été substitué avec de la cendre de balle de riz qui a été obtenue en brûlant les balles de riz à une température de 700°C. Le but c'est de réduire la quantité de ciment dans le béton en le substituant par de la cendre de balle de riz.
- On peut utiliser la cendre de balle de riz pour améliorer la cuisson du clinker. On peut aussi l'ajouter au clinker pour avoir du ciment Portland.
- Pour fertiliser les rizières et pour lutter contre la toxicité ferreuse dans les sols

- Par la teneur élevée des cendres en silice, les balles de riz sont autrement utilisées, après une simple calcination, pour la fabrication familiale de produits abrasifs fins ou détergents connus sous le nom de « Maika ».
- Transformer les cendres de balle de riz en des dérivatifs à haute valeur ajoutée tels que des isolants (cendre pour répartiteur), des pouzzolanes (similaires à la fumée de silice pour une utilisation dans le secteur du bâtiment) et des zéolites.
- Les cendres de balle de riz sont considérées comme source alternatifs de la silice dans la composition pneumatique et dans la fabrication du ciment.
- Les cendres de balle de riz ont des potentialités insecticides. Cette potentialité est due à la finesse de la granulométrie et l'élévation du teneur en silice.

## **II-4 LE SABLE :** [14] [15]

### **II-4-1 Définition :**

Le sable est une masse meuble de matières minérales inorganisées, finement granuleuses, habituellement composées de quartz (silice).

Elle est composée de petites particules appelées grains, issus de différents minéraux, généralement du granit ou du quartz. La taille de ces grains est différente à chaque fois : leur mesure est appelée **granulométrie**.

### **II-4-2 Les différents types de sable :**

Les sables comprennent tous les éléments refusés au tamis de 80  $\mu\text{m}$  et passant à travers le tamis de 5 mm.

Les sables sont subdivisés en :

- Sables fins, dont les diamètres des grains variant de 80  $\mu\text{m}$  à 316  $\mu\text{m}$ .
- Sables moyens, dont les diamètres des grains variant de 316  $\mu\text{m}$  à 1,25 mm ;
- Sables gros, dont les diamètres des grains variant de 1,25 mm à 5 mm.

Tableau 7 : Séries de tamis normalisé pour le sable

<b>Diamètre des Tamis (mm)</b>	<b>Module AFNOR</b>
0.080	20
0.160	23
0.250	25
0.315	26
0.500	28
0.630	29
1	31
1.250	32
2	34
2.500	35
3.150	36
5	38

Source : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain « Formulation et modélisation mathématiques des comportements des bétons fluides à haute compacité par plans d'expérience »

Le module d'un tamis est calculé par la relation suivante :

$$\text{Module} = 31 + 10 \log D$$

Avec D, le diamètre de tamis exprimé en [mm]

Il existe des sables d'origines différentes, parfois formés de roches très rares. Sables blancs et sable noirs. La couleur dépend de ses origines :

- Les sables clairs sont composés de grains de quartz et de débris de coquillage ;
- Les sables noirs viennent d'une roche volcanique comme le basalte

#### **II-4-3 Propriétés :**

Leurs caractères communs principaux sont leur richesse en silice ( $\text{SiO}_2 > 98\%$ ).

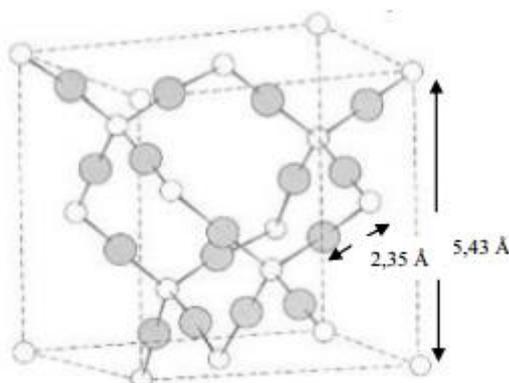
Le sable suit généralement les variations de la température. Si la température du milieu augmente, le sable se chauffe et peut atteindre le maximum. Quand il se refroidit, cet aspect n'est qu'un grain de sable dans la complexité de ce milieu, il atteint la température de glace.

À Madagascar par exemple, les gens mettent du sable dans leur four pour augmenter et maintenir la température.

#### **II-4-4 Structure cristallin :**

La structure cristallographique du silicium ( $\text{SiO}_2$ ) monocristallin est une structure cubique diamant dans laquelle deux réseaux cubiques à faces centrées s'interpénètrent.

Les liaisons entre les atomes sont de type covalent avec une distance interatomique de 2.35 Å et un paramètre de maille  $a=5.43$  Å.



**Figure 8 :** Structure du  $\text{SiO}_2$  à l'état cristallisé

- Si
- O

#### **II-4-5 Caractéristiques des principaux constituants du sable :**

Le tableau suivant nous résume la densité, la dureté et la couleur des principaux constituants du sable :

Tableau 8 : Caractéristiques des principaux constituants du sable

	<b>Feldspath</b>	<b>Mica</b>	<b>Magnétite</b>	<b>Quartz</b>
<b>Densité</b>	2.5 à 2.8	2.7 à 3.2	5.18	2.65
<b>Dureté</b>	6 à 6.5	2 à 4	5.5 à 6.5	7
<b>Couleur</b>	Blanc/incolore	Variée	Noire Opaque	Vitreux transparent

Source : RANDRIAMBOLOLOMANANA Patrice « Optimisation de la composition des briques pour stabilisés ses propriétés mécaniques ».

## **CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES PLANS** **D'EXPERIENCE [15] [16]**

### **III-1 PRINCIPE DES PLANS D'EXPERIENCES :**

La technique des plans d'expériences consiste à faire varier simultanément les niveaux d'un ou plusieurs facteurs (qui sont les variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés, en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère et en permettant de modéliser facilement les résultats. Le point délicat dans l'utilisation des plans d'expériences sera donc de minimiser le plus possible le nombre d'expériences à mener sans sacrifier la précision des résultats. Il existe actuellement un nombre important de plans différents. Chacun, par ses propriétés, permet de résoudre certains problèmes particuliers. Nous pouvons cependant diviser les plans d'expériences en deux grandes catégories :

- Les plans pour étudier (estimer et comparer) les effets des paramètres,
- Les plans pour régler les paramètres afin d'atteindre un optimum.

L'expérimentateur doit concevoir le plan d'expérience adéquat afin de répondre à une problématique bien précise. Il faut donc choisir ou construire le plan qui donnera les informations recherchées. On ne pourra donc pas utiliser le même plan pour étudier efficacement les effets des paramètres tout en cherchant un optimum.

### III-2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE :

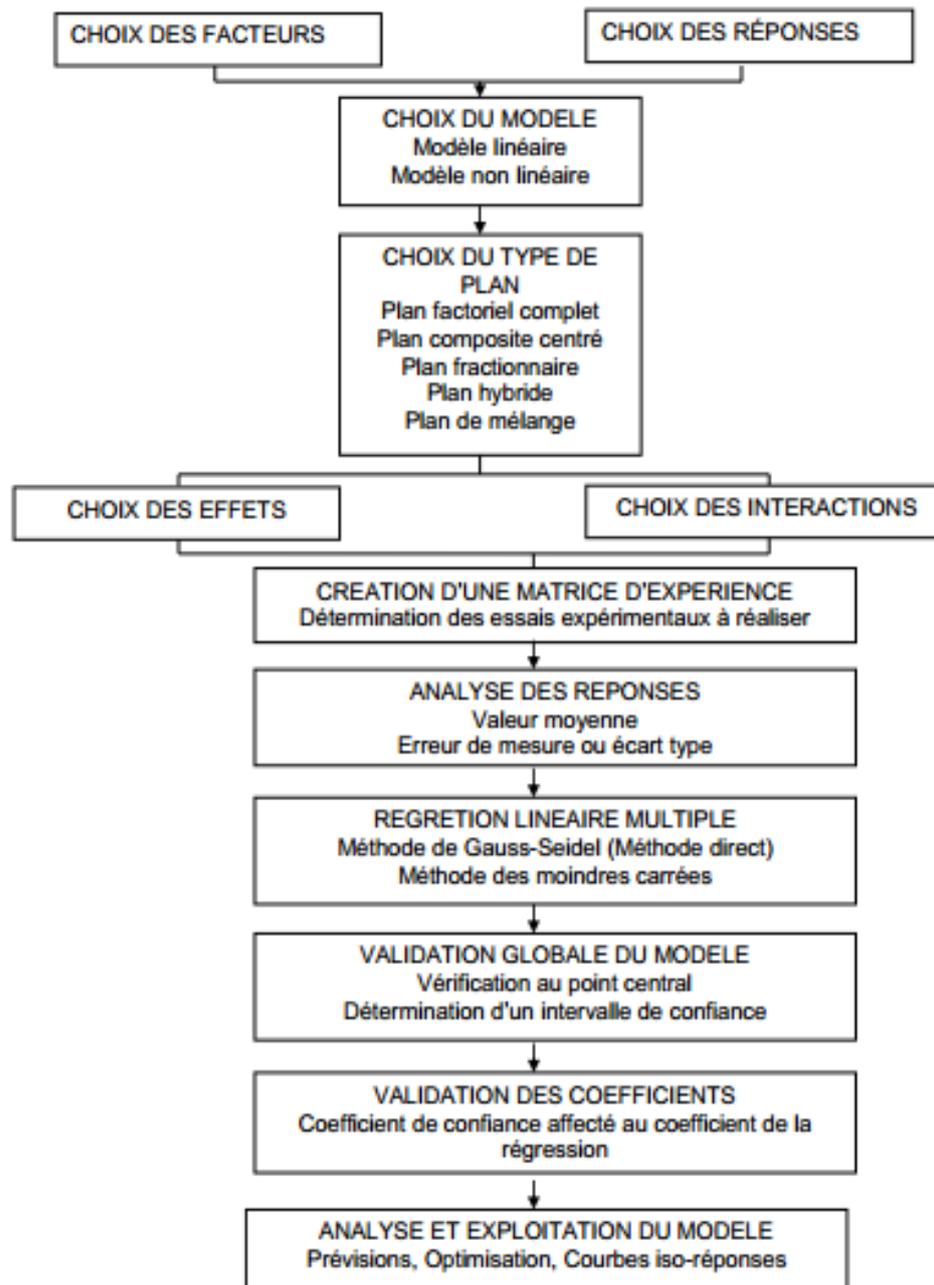


Figure 9 : Organigramme général de traitement des plans d'expériences

### III-3 CHOIX DE LA METHODE D'EXPERIMENTATION :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le coût minimum.

### **III-4 ANALYSE DES RESULTATS :**

L'analyse des résultats d'expériences est facilitée par le choix initial des expériences. Les résultats seront faciles à interpréter et riches d'enseignement si l'on a bien préparé les expériences. Grâce aux ordinateurs et aux logiciels, la construction des plans d'expériences et les calculs nécessaires à leur interprétation sont devenus très simples. Ces outils favorisent également les représentations graphiques qui illustrent de manière spectaculaire les résultats et améliorent la compréhension des phénomènes.

### **III-5 CONDITIONS D'APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCE :**

Les plans d'expériences sont des instruments bien adaptés à la recherche à chaque fois qu'intervient un grand nombre de paramètres. Ils permettent de réduire fortement le nombre d'essais, de gagner du temps, tout en parvenant à un meilleur résultat. Trois éléments sont indispensables pour réussir cette démarche :

- La planification des essais et la qualité de l'expérience,
- Ensuite, la maîtrise d'outils mathématiques tels que la régression linéaire multiple,
- Enfin, l'apport des statistiques pour la validation globale des modèles et la détermination des effets significatifs.

Pour appliquer la méthode des plans d'expériences et, en particulier, les méthodes s'appuyant sur les régressions linéaires multiples, il faut que les deux conditions suivantes soient réalisées :

- Condition 1 : La valeur que prend chaque variable doit être connue sans erreur, or, dans un travail d'expérimentation on ne peut nier la présence d'erreur. Donc pour satisfaire cette condition on doit s'assurer que l'erreur induite sur la valeur de la variable soit très petite, voire négligeable devant la variation de cette même variable lorsqu'elle change de valeur.
- Condition 2 : La réponse doit être homoscedastique. Cela signifie que l'erreur de mesure doit être la même sur tout le domaine expérimental. Pour cela il appartient à l'expérimentateur de garder les mêmes gestes, le même matériel et la même cadence lors de toute la campagne d'expérimentation.

### **III-6 VOCABULAIRES DE BASE DES PLANS D'EXPERIENCE :**

Le scientifique est souvent amené à comprendre comment réagit un système en fonction des facteurs susceptibles de le modifier. Pour visualiser cette évolution, il mesure une réponse et va ensuite essayer d'établir des relations de cause à effet entre les réponses et les facteurs.

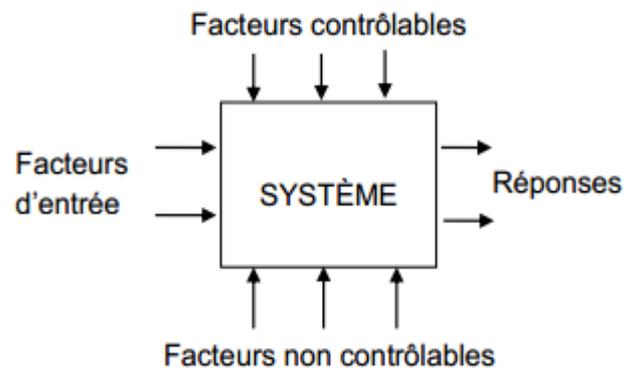


Figure 10 : Vocabulaires de base des plans d'expérience

#### **III-6-1 Les facteurs :**

Un facteur est une variable, ou un état, qui agit sur le système étudié. Un facteur peut être de type continu (température, mesure d'une longueur) ou discret (marque de l'outil, robinet ouvert ou fermé).

- les facteurs contrôlables qui dépendent directement du choix (pression, température, matériau ...)
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix (conditions climatiques, environnement d'utilisation...)
- les facteurs d'entrée dont on cherche à analyser une influence (matière première, vitesse d'agitation, température,) les facteurs étudiés dans un plan d'expériences sont bien entendu les facteurs d'entrée.

Il existe 2 types :

##### **- Facteur quantitatif :**

Facteurs dont la valeur est mesurable, souvent à variation continue par exemple le dosage en ciment, pourcentage d'adjuvant, masse de sable, etc... Et rarement à variation discontinue ex : classe de ciment qui est fixée par le cimentier.

### - Facteur qualitatif :

Facteurs dont la valeur est non mesurable, comme la qualité, le type, la marque, le procédé ou d'autres caractéristiques qu'on ne peut quantifier par exemple le type de ciment (CPA. CPJ. CLK...), le procédé de vibration du béton (table vibrante ou aiguille).

- **Niveau d'un facteur :** Valeur que prend le facteur au cours des essais, il importe d'attribuer à chaque facteur au moins deux niveaux : un niveau supérieur et un niveau inférieur. Pour les facteurs quantitatifs, la valeur est algébrique, donc classée numériquement. Pour les facteurs qualitatifs les valeurs ne sont pas mesurables, alors peu importe leur classement, l'important est de mettre une borne inférieure et une borne supérieure (+1 et -1). Les niveaux extrêmes de chaque facteur délimitent le domaine de l'étude.
- **Valeurs centrées réduites ou codées :** L'utilisation des variables centrées réduites présente l'intérêt de pouvoir généraliser la théorie des plans d'expériences, quels que soient les facteurs ou les domaines d'études retenus. Remplacer les variables naturelles par les variables codées va permettre d'avoir pour chaque facteur le même domaine de variation (entre -1 et +1) et de pouvoir ainsi comparer entre eux l'effet des facteurs. Le niveau bas est ainsi codé (-1) alors que le niveau haut est codé (+1).

### **III-6-2 Réponse :**

La réponse est la grandeur mesurée à chaque essai ; le plan vise à déterminer les facteurs influençant ou l'évolution de l'influence en fonction de ceux-ci. Cette grandeur est souvent mesurable comme la résistance à la compression, l'affaissement et l'air occlus (la porosité), mais elle peut également être qualitative, par exemple une appréciation visuelle sur l'état d'une surface ou une appréciation (ségrégation, pas de ségrégation) sur un béton.

- **L'effet d'un facteur :** L'effet d'un facteur  $[X_i]$  est la comparaison entre les valeurs prises par la réponse  $[Y]$  lorsque cette dernière passe du niveau (-1) au niveau (+1). Il est caractérisé par une constante notée «  $A_i$  » qui sera :

-Positive si cette variation du facteur est favorable à l'accroissement de la réponse

- Négative si elle est favorable à la diminution de la valeur de la réponse

- Nulle si elle est sans influence sur le système.

Cette constante intervient dans le modèle mathématique décrivant cette réponse.

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i$$

Y : Réponse prédite par le modèle.

A<sub>0</sub> : Constante du modèle elle répond à la moyenne des résultats de mesure.

X<sub>i</sub> : Facteur « i ».

A<sub>i</sub> : Effet du facteur « i ».

k : Nombre de facteurs étudiés.

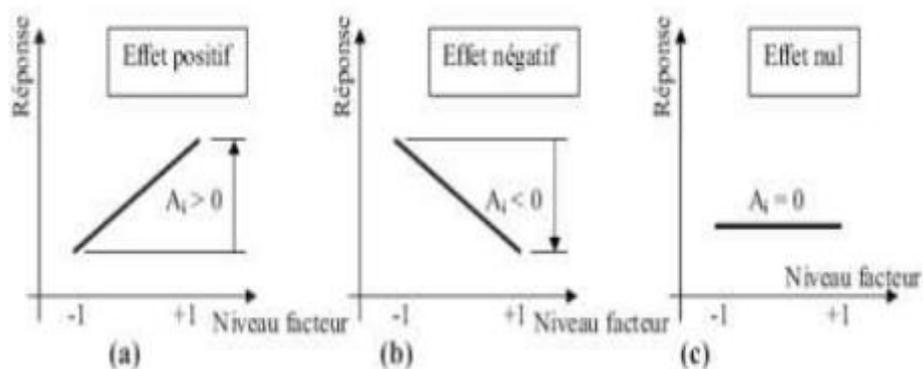


Figure 11 : Effet de facteur à étudier

- **Interaction** : Une notion importante est celle d'interaction entre deux facteurs d'entrées. On parle d'interaction entre deux facteurs X<sub>i</sub> et X<sub>j</sub> quand l'effet du facteur X<sub>i</sub> sur la réponse va dépendre de la valeur du facteur X<sub>j</sub>. Dans la plupart des cas, les études se limitent au premier ordre (interactions entre deux facteurs) [M. Pillet, 1992]. Noté «A<sub>ij</sub>» l'interaction intervient dans le modèle de la manière suivante

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i X_i + \sum_{ij} A_{ij} X_i X_j$$

A<sub>ij</sub> : Effet d'interaction X<sub>i</sub> X<sub>j</sub>

- **Matrice des effets** : La matrice des essais à réaliser pour obtenir le plan d'expériences optimal se déduit en fait des critères permettant d'obtenir les coefficients avec le maximum de précision. Le système d'équations à résoudre doit présenter des coefficients devant les inconnues (qui sont les coefficients du modèle à déterminer) pouvant se mettre sous la forme d'une matrice nommée matrice des effets.

Par exemple pour le plan de deux niveaux à deux facteurs la matrice des effets s'écrira sous la forme :

$$\begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{pmatrix}$$

Figure 12 : Exemple de matrice des effets

Cette matrice est dite matrice de Hadamard.

Pour cette matrice, les vecteurs colonnes sont orthogonaux deux à deux. Cette propriété n'est pas suffisante pour obtenir la variance minimale pour l'estimation des coefficients. Hadamard a montré que la matrice X devait aussi vérifier la condition :

$$X^t \cdot X = N \cdot I$$

Où  $X_t$  : la matrice transposée de X.

I : la matrice identité.

N : le nombre d'expériences réalisées.

N doit être un multiple de 4.

Par exemple, on verra que pour un plan complet à n facteurs, le nombre d'expériences N sera égal à :  $N = 2^n$

Soit 8 expériences avec 3 facteurs permettant la détermination des 8 coefficients du modèle et 16 expériences avec 4 facteurs.

- **Modélisation mathématique de la réponse :** Pour permettre la prévision de la réponse et l'optimisation du système, la méthode des plans d'expériences de par sa conception et sa structure permet une représentation mathématique de la réponse « y » en fonction des facteurs sujets de l'étude.

Nous nous limiterons aux modèles polynomiaux linéaires en utilisant la régression linéaire multiple qui se base principalement sur la méthode des moindres carrés. Deux conditions doivent être respectées :

- Le nombre minimal des essais effectués doit être égal au nombre des inconnues  $A_i$ , et augmente avec le degré du polynôme. Donc il est de notre intérêt de rechercher les modèles les plus simples avant tout.
- Le modèle constitué doit être validé afin que les prévisions soient fiables.

Les plans d'expériences dits factoriels utilisent tous le modèle mathématique suivant qui relie la réponse Y aux facteurs  $X_1, X_2, \dots, X_i \dots X_n$ . Ce modèle théorique est postulé a priori. Il s'agit d'un modèle polynomial.

Les modèles recherchés sont des modèles exprimant la réponse « yj » en fonction des facteurs « Xi » et leurs interactions :

$$Y_j = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_1 X_3, \dots, X_1 X_2 X_3, \dots)$$

$$Y = A_0 + A_1 X_1 + A_2 X_2 + \dots + A_n X_n + \sum_{i,j=1; i \neq j}^n A_{ij} X_i X_j + \sum_{i,j,k=1; i \neq j \neq k}^n A_{ijk} X_i X_j X_k + \dots$$

Sous forme matricielle, on a

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_j \\ Y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots & X_i & \dots & X_i X_j & \dots & X_i X_j X_k \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_j \\ A_{jk} \end{bmatrix}$$

De façon condensée :  $[Y] = [X] \cdot [A]$

Où les inconnues du problème sont les composantes du vecteur

$$[A] = [X]^{-1}[y]$$

Où  $A_0, A_1, \dots, A_n$  : sont les coefficients du polynôme.

$X_i$  : représente un niveau du facteur  $i$

$X_j$  : représente un niveau du facteur  $j$

$Y$  : la réponse ou la grandeur d'intérêt

Les termes produits de type par exemple  $A_{ij}X_iX_j$  correspondent aux interactions d'ordre 2. Les termes produits de type par exemple  $A_{ijk}X_iX_jX_k$  correspondent aux interactions d'ordre 3.

Le calcul d'un effet de facteur ou d'une interaction entre facteurs fait intervenir l'ensemble des résultats de mesure. Or ces derniers sont collectés tout le long de la campagne expérimentale, ils sont entachés d'erreurs de mesure. Et que seul l'écart type de mesure permet son estimation. Après avoir établi le modèle mathématique, il s'agit de savoir si les coefficients du modèle (facteurs et interactions) sont significativement différents de zéro. En effet, des valeurs mathématiques voisines de zéro peuvent être la conséquence de la dispersion expérimentale autour d'une valeur moyenne nulle. On va donc comparer la valeur du coefficient à l'erreur de mesure. Si ces deux valeurs sont du même ordre de grandeur, on conclura à la nullité de l'effet (ou de l'interaction) envisagé.

Pour un plan factoriel à 3 facteurs  $X_1, X_2$  et  $X_3$ , on obtient :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 + A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 + A_{123}X_1X_2X_3$$

- **Modélisation expérimentale :** Deux compléments doivent être apportés au modèle purement mathématique précédemment décrit. Le premier complément est le manque d'ajustement. Cette expression traduit le fait que le modèle choisi par l'expérimentateur avant les expériences est probablement un peu différent du modèle réel qui régit le phénomène étudié. Il y a un écart entre ces deux modèles. Cet écart est le manque d'ajustement, on le note par la lettre  $D$ .

Le second complément est la prise en compte de la nature aléatoire de la réponse.

En effet, dans le cas général, si l'on mesure plusieurs fois une réponse en un même point expérimental, on n'obtiendra pas exactement le même résultat. Il y a une dispersion des résultats. Les dispersions ainsi constatées sont appelées erreurs aléatoire ou erreurs expérimentales et on les note par la lettre « e ». La relation générale doit être modifiée ainsi :

$$Y = f(X_1, X_2, X_3) + D + e \dots$$

- **Calcul des coefficients :** Dans le cas d'une matrice de Hadamard, les coefficients peuvent aisément être calculés avec une simple calculatrice ou un tableur. On reprend pour cela l'exemple du plan de trois facteurs à deux niveaux. Les résultats de calcul des coefficients sont récapitulés dans le tableau suivant

Tableau 9 : Calcul des coefficients  $A_0, A_1, A_2, A_3$  de trois facteurs à deux niveaux dans le cas des matrices de Hadamard

N° ESSAI	CONSTANT	X1	X2	X3	RESULTATS (Y)
ESSAI 1	1	-1	-1	1	Y1
ESSAI 2	1	1	-1	-1	Y2
ESSAI 3	1	-1	1	-1	Y3
ESSAI 4	1	1	1	1	Y4

Source : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain « Formulation et modélisation mathématiques des comportements des bétons fluides à haute compacité par plans d'expérience »

On calcul  $A_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}$  ;

$$A_1 = \frac{-Y_1 + Y_2 - Y_3 + Y_4}{4}$$
 ;

$$A_2 = \frac{-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4}{4}$$
 ;

$$A_3 = \frac{Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4}{4}$$

- **Les surfaces de réponse :** À chaque point du domaine d'études correspond une réponse. À l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée surface de réponse.

L'ensemble des réponses qui correspond à tous les points du domaine d'études forme la surface de réponse.

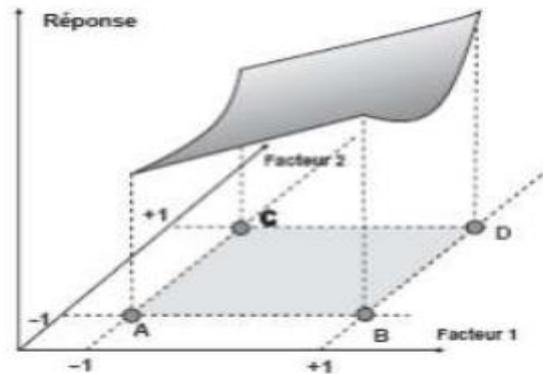


Figure 13 : Surface des réponses

En général, on ne connaît que quelques réponses, celles qui correspondent aux points expérimentaux retenus par l'expérimentateur. On interpole à l'aide d'un modèle mathématique, les réponses inconnues pour obtenir la surface de réponse. Les points d'expériences retenus par la théorie des plans d'expériences assurent la meilleure précision possible sur la forme et la position de la surface de réponse.

### **III-7 LES TYPES DE PLANS D'EXPÉRIENCES :**

Il existe plusieurs types de plans d'expériences : les plans de mélange, les plans factoriels, les plans hybrides, les plans fractionnaires et les plans de Plackett et Burman.

Pour pouvoir expliquer davantage, cette méthode de plans d'expériences nous allons donner dans ce qui suit, quelques détails concernant les plans factoriels complet, les plans de mélanges et les plans hybrides.

#### **III-7-1 Plans factoriels complets :**

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels, c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés, car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets.

Avec deux niveaux et k facteurs, ceux-ci sont notés  $2^k$ . Dans un plan factoriel complet, la totalité des expériences doit être réalisée, comme dans la méthodologie standard.

Pour un plan factoriel complet optimal à k facteurs, il va donc falloir mener  $2^k$  expériences. Le principe consiste alors à répartir de façon optimale les essais dans le domaine expérimental. Soit par exemple un plan factoriel complet à 2 facteurs, noté :  $2_2$ . La meilleure stratégie consiste à choisir les points de mesures aux extrémités du domaine expérimental, ce qui accroît la précision du résultat et ne demande que 4 essais notés.

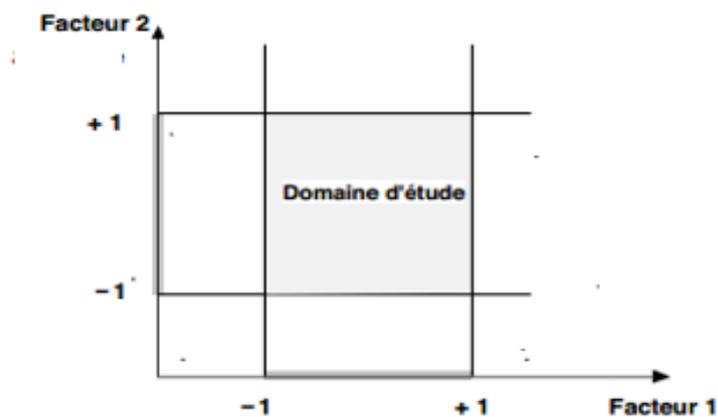


Figure 14 : Emplacement des points expérimentaux dans un domaine expérimental

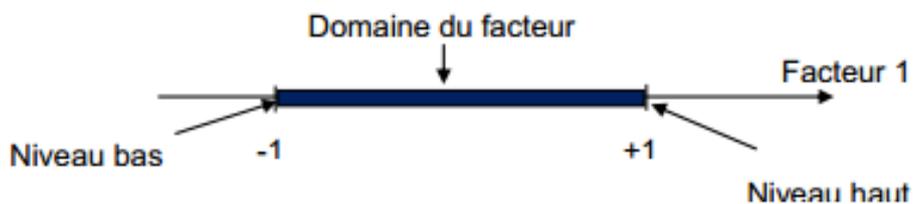


Figure 15 : Représentation de niveaux du facteur dans un plan factoriel complet

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

### **III-7-2 Plans factoriels complets à deux niveaux :**

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation.

Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

**a) Plans à deux facteurs :**

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est un carré. Le modèle mathématique postulé est un modèle du premier degré par rapport à chaque facteur :

$$Y = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2 + \dots$$

Y : est la réponse

X<sub>1,2</sub> : représente le niveau attribué au facteur 1,2

A<sub>0</sub> : est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude

A<sub>1</sub> : est l'effet (ou effet principal) du facteur 1

A<sub>2</sub> : est l'effet (ou effet principal) du facteur 2

A<sub>12</sub> : est l'interaction entre les facteurs 1 et 2

e : est l'écart.

La matrice d'expériences se construit selon le tableau suivant pour le cas des plans 2<sup>2</sup> et avec des facteurs A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>.

Tableau 10 : Matrice d'expérience pour les plans d'expérience à deux niveaux et à 2 facteurs

<b>Essais</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>
<b>Essai N°1</b>	-1	1
<b>Essai N°2</b>	1	-1
<b>Essai N°3</b>	-1	1
<b>Essai N°4</b>	1	-1

Source : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain « Formulation et modélisation mathématiques des comportements des bétons fluides à haute compacité par plans d'expérience »

**b) Plans factoriels à k facteurs :**

On peut augmenter le nombre de facteurs. L'espace expérimental possède autant de dimensions qu'il y a de facteurs et le modèle mathématique correspond à la relation.

$$Y = A_0 + \sum A_i X_j + \sum A_{ij} X_i X_j + \dots + \sum A_{ij} X_i + A_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z + e \dots$$

Un plan comportant  $k$  facteurs à deux niveaux est noté  $2^k$ . Le  $k$  en exposant signifie qu'il y a  $k$  facteurs étudiés. Le chiffre 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte  $k$  colonnes pour les facteurs principaux et  $2^k$  lignes soit  $2^k$  essais. Elle se construit selon la règle suivante :

- colonne du 1er facteur : alternance de -1 et +1
- colonne du 2e facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- colonne du 3e facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- colonne du 4e facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8 et ainsi de suite pour un nombre plus élevé de facteurs.

### **III-7-3 Plans factoriels complets à trois niveaux :**

S'il y a deux facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter 9 essais. On note ce plan  $3^2$ . S'il y a trois facteurs prenant chacun trois niveaux (plan  $3^3$ ), il faut exécuter 27 essais. En général s'il y a  $k$  facteurs prenant chacun trois niveaux, il faut exécuter  $3^k$  essais. Ce qui commence à faire beaucoup. C'est la raison pour laquelle il existe aussi les plans fractionnaires correspondants qui portent le nom de carrés latins.

### **III-7-4 Plans fractionnaires :**

Pour les plans factoriels complets, le nombre d'essais augmente de façon exponentielle ( $N=n^k$ ), à partir d'un certain nombre de facteurs et de niveaux, la charge expérimentale devient trop pénible à réaliser.

D'où les plans fractionnaires. Les plans fractionnaires optimaux sont des plans issus des plans factoriels complets.

Leur intérêt principal est de réduire cette charge expérimentale en focalisant sur les effets les plus intéressants sans pour autant affecter de façon compromettante l'efficacité du plan. Il existe deux types :

#### **Plans fractionnaires $2^{k-p}$**

Ce plan consiste à utiliser pour l'étude de «  $k$  » facteurs la matrice d'effet d'un plan factoriel complet  $2^{k-1}, 2^{k-2}, 2^{k-3}, \dots$ . Ce qui permet de réduire le nombre d'essais par  $2^p$ .

Nous remarquons que pour un plan factoriel complet les interactions d'ordre deux et plus sont le plus souvent négligeables. L'astuce est que les interactions les moins influentes sont remplacées par les facteurs « k - p » ..... « k », en suivant leurs mêmes alternances de signes. Le plan obtenu est dit fractionnaire  $2^{k-p}$ .

Pour k facteurs prenant deux niveaux le plan complet est noté  $2^k$ .

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet possède  $1/2 \cdot 2^k$  ou  $2^{k-1}$  essais. On peut donner une signification à chaque caractère de cette notation :

Le k signifie qu'il y a k facteurs étudiés.

Le 2 signifie que chaque facteur prend deux niveaux.

Le 1 signifie que le nombre d'essais du plan a été divisé par  $2^1$ .

Un plan  $2^{5-2}$  permet d'étudier cinq facteurs prenant chacun deux niveaux en 8 essais. Le plan complet a été divisé par  $2_2 = 4$ . Un plan  $2^{k-p}$  permet d'étudier k facteurs prenant chacun deux niveaux. Le plan complet a été divisé par  $2^p$ .

### **III-7-5 Plans de mélange :**

Les facteurs d'étude des plans de mélanges sont les proportions des constituants du mélange. Or, ces constituants ne sont pas indépendants les uns des autres. La somme des proportions d'un mélange est toujours égale à 100%. Le pourcentage du dernier constituant est imposé par la somme des pourcentages des premiers composés. C'est la raison pour laquelle les plans de mélanges sont traités à part. Les plans de mélanges sont aussi caractérisés par de nombreuses contraintes qui peuvent peser sur le choix des proportions des constituants. Par exemple, la concentration d'un produit doit être au moins de x pour-cent ou cette concentration ne peut excéder une valeur donnée. En fonction de ces contraintes la planification de l'étude est modifiée et elle doit être adaptée à chaque cas.

On utilise un triangle équilatéral pour représenter les mélanges à trois composants. Les produits purs sont aux sommets du triangle équilatéral. Les mélanges binaires sont représentés par les côtés du triangle. Par exemple, le côté gauche du triangle représente les mélanges composés uniquement des produits A et B.

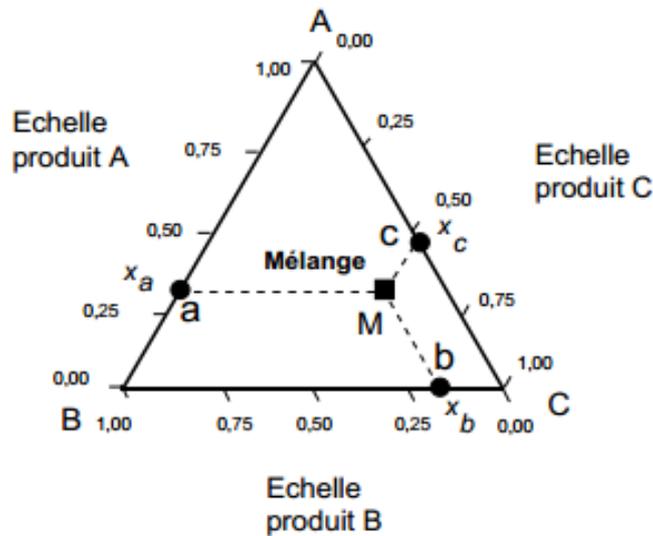


Figure 16 : Représentation des mélanges à trois constituants sur un triangle équilatéral.

Il est tout à fait possible de traiter à la fois des variables de mélanges (les proportions des constituants) et des facteurs de plan d'expériences. Pour illustrer cette situation on peut prendre l'exemple d'un fabricant de chocolat. L'étude de la composition du chocolat donne lieu à un plan de mélanges et les conditions de préparation donnent lieu à un plan d'expériences factoriel ou du second degré. A chaque point d'expériences du plan factoriel, il faut réaliser un plan de mélanges. On a donc rapidement un grand nombre d'essais à réaliser puisqu'il faut faire  $np$  essais si le plan de mélange à  $n$  essais et le plan d'expériences  $p$  essais.

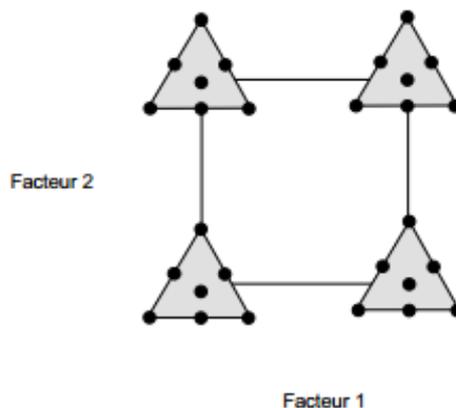


Figure 17 : Plans de mélange et plan d'expériences

### **III-7-6 Plans hybrides :**

Les plans hybrides ont été mis au point par Roquemore [Brereton R, 2006]. Leur objectif est d'essayer d'approcher deux critères d'optimalité, celui d'orthogonalité et celui d'isovariance par rotation. L'orthogonalité garantit la meilleure précision possible sur les coefficients du modèle et l'isovariance par rotation conduit à des erreurs de prévisions identiques à une même distance du centre du domaine. Si l'expérimentateur recherche ces deux propriétés, il doit penser à utiliser un plan hybride. Les plans hybrides se désignent de la manière suivante : on indique le nombre de facteurs, puis le nombre de points expérimentaux dont un seul point central, enfin une lettre pour distinguer deux plans ayant le même nombre de facteurs et le même nombre de points expérimentaux.

### **III-8 STATISTIQUES APPLIQUES PAR LES PLANS D'EXPÉRIENCES :**

- **Erreur expérimentale**

En général, on prend la moyenne arithmétique comme valeur centrale et l'écart type comme mesure de la dispersion.

- **Moyenne**

La moyenne arithmétique d'un ensemble de valeurs est la somme de toutes les valeurs divisées par le nombre de valeurs.

- **Écart- type**

La définition de l'écart-type est un peu moins simple que celle de la moyenne. Nous allons décrire son calcul pas à pas :

- On commence par calculer les écarts à la moyenne, c'est-à-dire la différence entre chaque valeur et la moyenne.

- La variance est la somme des carrés des écarts à la moyenne divisée par le nombre de valeurs moins 1.

- Enfin l'écart-type est obtenu en prenant la racine carrée de la variance.

- **Intervalle de confiance des réponses**

Nous venons de voir l'importance de l'écart-type de la population des réponses qui est considéré comme une évaluation de l'erreur expérimentale ou erreur pure. L'estimation de l'écart-type(S) d'une population de réponses à partir d'un échantillon est obtenue à l'aide de la relation :

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_l)^2}$$

Mais la qualité de cette estimation dépend du nombre n de valeurs prises en compte pour calculer l'écart-type. Si l'échantillon contient beaucoup de mesures, l'écart-type calculé sera de bonne qualité, c'est-à-dire proche de l'écart-type de la population. Si l'échantillon contient peu de mesures, l'écart-type calculé sera de moins bonne qualité et il faudra prendre des précautions supplémentaires pour l'utiliser. L'intervalle de confiance  $I_c$  dépend :

- De la probabilité choisie par l'utilisateur ; cette probabilité est souvent de 95 ou 99 %
- De la qualité de l'écart-type calculé.

$$I_c = k \cdot \sigma_{\text{échantillon}}$$

- **Analyse de la variance**

L'analyse de la variance consiste à rechercher les sources de variation des réponses. On suppose que les réponses ont été calculées avec le modèle postulé,

$Y_i = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + e_i$ , en utilisant la méthode des moindres carrés, c'est-à-dire en minimisant la somme des carrés des écarts. Dans ce cas, les réponses calculées s'écrivent et les écarts (e) prennent des valeurs particulières  $r_i$  qui s'appellent les résidus. Les résidus sont donc des valeurs particulières des écarts. On a :

$$\bar{y}_l = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

Avec ces nouvelles notations, la relation donnant la réponse peut s'écrire :

$$y_i = \bar{y}_l + r_1$$

L'analyse classique de la variance fait intervenir non pas les réponses, mais la différence entre les réponses et leur moyenne.

- **Coefficient de détermination ( $R^2$ )**

L'analyse de la variance permet de calculer une statistique très utile : le  $R^2$  ou  $R$  carrés.

Cette statistique est le rapport de la somme des carrés des réponses calculées (corrigées de la moyenne) à la somme des carrés des réponses mesurées (corrigées de la moyenne) :

$$R^2 = \frac{\text{Sommes des carrées des réponses calculées corrigées de la moyenne}}{\text{Sommes des carrées des réponses mesurées corrigées de la moyenne}}$$

Le  $R^2$  est une mesure de la qualité du modèle. S'il est égal à 1, le modèle permet de retrouver la valeur des réponses mesurées. S'il est égal à 0, le modèle n'en dit pas plus que la moyenne des réponses. Le  $R^2$  joue véritablement son rôle d'indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus sont nuls, le  $R^2$  est égal à 1 quelle que soit la qualité du modèle. On observe un tel cas lorsqu'il n'y a pas de degrés de liberté. Le  $R^2$  est donc un bon indicateur de la qualité du modèle s'il y a plus de points expérimentaux différents que de coefficients dans le modèle postulé.

- **Résidus**

C'est la différence entre la réponse mesurée et la réponse calculée

- **P-Value**

La « P-Value » est la probabilité qu'un coefficient soit négligeable. On calcule cette « P-Value » à partir du rapport du coefficient à son écart-type (test de Student). La probabilité d'acceptation des coefficients à un « P-value » de 0,10.

- **F de Fisher**

Le F de Fisher qui est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus. Ce rapport permet de calculer la probabilité que ces deux carrés ne soient pas égaux. En d'autres termes, si le F de Fisher est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs.

Si le F de Fisher est proche de 1 (forte probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus.

- **Variance de mesure :**

$$V(y) = S_0^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_0 - y_{0i})^2$$

$V(y)$  : Variance de mesure.

$y_0$  : Moyenne des essais au centre du domaine.

$y_{0i}$  : Essai « i » au centre du domaine.

- **Validation du modèle**

La validation du modèle issue de la régression linéaire se fait en comparant les valeurs mesurées au centre du domaine avec ceux prédits par le modèle en ce même point. Le modèle est validé si la réponse «  $y_0$  » mesurée au centre du domaine appartient à l'intervalle :

$$y_{\text{modèle}} \pm k \cdot \sigma(y)$$

$y_{\text{modèle}}$  : Valeur donnée par le modèle au centre.

$\sigma(y)$  : Écart type des mesures

### **III-9 LES LOGICIELS DE PLANS D'EXPERIENCES :**

La construction des plans d'expériences est souvent facile et il suffit de choisir parmi les matrices déjà publiées. Mais, il importe que le plan soit adapté à l'étude et non pas l'inverse. Il y a donc des situations où il faut absolument tailler un plan sur mesure. Les logiciels de plan d'expériences possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire les plans sur mesures. En particulier, les plans de mélanges et les plans avec contraintes sur le domaine d'étude nécessitent l'usage d'un logiciel pour construire le plan le mieux adapté à l'étude.

On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel adapté qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique (Coefficient de détermination, écarts-types des réponses et des coefficients,  $p$ -value, etc.).

Les logiciels de plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tout le domaine d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'isoreponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt.

Tableau 11 : Principaux logiciels de plans d'expériences

JMP	<a href="http://www.jmpdiscovery.com">http://www.jmpdiscovery.com</a>
Minitab	<a href="http://www.minitab.fr">http://www.minitab.fr</a>
Statistica	<a href="http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica">http://www.intesoft.com/produits/tech/statistica</a>
Statgraphics	<a href="http://www.sigmaplus.fr">http://www.sigmaplus.fr</a>
Unscrambler	<a href="http://www.camo.no">http://www.camo.no</a>
Pirouette	<a href="http://www.infometrix.com">http://www.infometrix.com</a>
Modde	<a href="http://www.umetrics.com">http://www.umetrics.com</a>

Source : Jacques GOUPY « Les plans d'expériences »

## **PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES**

## **CHAPITRE IV : PREPARATIONS ET CARACTERISATIONS**

### **DES MATIERES PREMIERES**

#### **IV-1 SCIURE DE BOIS :**

Le choix de la sciure de bois comme renfort est qu'elle est très abondante, d'après les enquêtes qu'on a faites il existe plus de 51 industries de scieries à Antsirabe, chaque industrie produit 20 sacs de déchets par jour en moyenne, un sac pèse 60 Kg, d'après les calculs ce dernier produit 1,2 tonnes par jour pendant la période d'été mais cette production diminue jusqu'à 8 à 10 sac par jour pendant la période de pluie suite à la difficulté de transport de bois. De ce fait, les déchets de sciures de bois atteignent jusqu'à une dizaine de tonnes par jour.

##### **IV-1-1 Préparation :**

La sciure de bois est récoltée dans les usines de scierie et menuiseries d'Antsirabe. Elles coutent 1000 Ariary le sac de charbon de 150Kg. Ce sont des sciures de pin puisque la majorité des scieries et menuiseries d'Antsirabe travaillent le bois de pin.

Ils sont ensuite tamisés au tamis de 0.4mm.



Photo 1 : Tamis de 0.4mm d'ouverture    Photo 2 : Sciure de bois tamisé à 0.4mm d'ouverture

#### **IV-1-2 Caractérisation :**

##### **a) Caractéristique physique :**

Tableau 12 : Caractéristique physique de la sciure de bois

Couleur	Jaune cassé
Odeur	Odeur de résine de pin
Taux d'humidité	19%
Masse volumique apparente	0.17 Kg/L
Densité	0.17

Source : Auteur

##### **b) Composition chimique :**

Tableau 13 : Composition chimique de la sciure de bois

<b>Composition</b>	<b>Pourcentage (%)</b>
Cellulose	62
Lignine	21
Constituants secondaires	17

Source : RAZAFIMANANTSOA Onjaniaina « Conception d'une unité de production de matériaux de construction et de briquettes combustibles à partir des sciures de bois sise à Antsirabe »

#### **IV-2 LA CHAUX :**

##### **IV-2-1 Approvisionnement :**

On a utilisé la fleur de chaux « BOUTSIK » qui coute 4000 Ariary dans les quincailleries.



Photo 3 : La fleur de chaux « BOUTSIK »

Ensuite la fleur de chaux est tamisée au tamis normalisé AFNOR de 0.4mm.



Photo 4 : Tamisage de la chaux au tamis 0.4mm

#### **IV-2-2 Caractérisation :**

##### **a) Caractéristiques physiques :**

Tableau 14 : Caractéristique physique de la fleur de chaux « BOUTSIK »

Aspect	Poudre fine
Couleur	Blanche
Masse volumique	0.57 Kg/L
Densité	0.57
SSB	532.08 m <sup>2</sup> /Kg

Source : Auteur

##### **b) Caractéristiques chimiques :**

Tableau 15 : Pourcentage des constituants chimique de la chaux

Constituants	Teneur en %
SiO <sub>2</sub>	0.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10
CaO	48.45
MgO	17.30
SO <sub>3</sub>	0.50

Source : : RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie « Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux »

### **IV-3 LES CENDRES DE BALLE DE RIZ (RHA) :**

#### **IV-3-1 Fabrication de RHA :**

Voici les étapes de fabrication de RHA, le rendement de la transformation de la balle de riz en cendre est de 20.80 %.

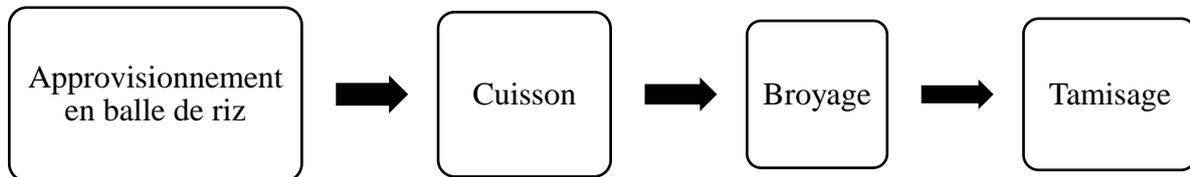


Figure 18 : Processus de fabrication de RHA

#### **a) Approvisionnement en balle de riz :**

La balle de riz est collectée dans les usines décortiqueuses de riz, le sac coute 1000 Ariary.

#### **b) Cuisson :**

Pour obtenir les cendres RHA riche en silice, il faut les calciner à une température d'environ 600°C.

Pour cela, nous avons fabriquer un incinérateur de 0.73 m<sup>3</sup> faite en brique cuite et muni d'une tôle comme couverture, on a posé des briques sur cette couverture au cas il y aurait beaucoup de vent. La tôle est munie d'une petite entaille au milieu pour évacuer la fumée ; l'incinérateur a aussi une ouverture en bas 7×9 cm pour l'alimentation en combustible.



Photo 5 ; Incinérateur de balle de riz

On a conçu avec des tôles, un système d'aération pour l'allumage.



Photo 6 : Système d'aération

Le processus de la cuisson commence par l'introduction de la quantité nécessaire de balle de riz dans l'incinérateur, quand il est rempli, il faut bien presser la balle de riz pour que le feu puisse se propager.

Ensuite, procédé à l'allumage. Comme combustible j'ai utilisé du bois. Bien refermé le couvercle et la petite ouverture en bas quand le feu est allumé.



Photo 7 : Chargement de balle de riz et allumage

L'obtention des RHA se fait en 2 étapes :

- **1<sup>e</sup> étape** : la carbonisation

La balle de riz commence à brûler et devient noirâtre. Cette étape dure environ 24 heures.



Photo 8 : Etape de carbonisation

- **2<sup>e</sup> étape** : étape de la combustion lente

La balle de riz carbonisée dans la première étape se transforme petit à petit en cendre, de couleur grise qui est une silice amorphe. Cette étape dure pendant 72 heures.



Photo 9 : RHA

La durée de ses étapes varie en fonction de la quantité de balle de riz introduites dans le four.

**c) Broyage :**

Le but du broyage est l'obtention de poudre fine de RHA car, plus elle est fine, plus elle est réactive. Nous avons utilisé le broyeur à boulet de la CNRIT.



Photo 10 : Broyeur à boulet

L'opération se déroule comme suit :

- chargement de RHA dans le broyeur
- laisser la machine tournée pendant 4 heures
- mise en sac du produit

**d) Tamisage :**

C'est l'étape suivant après le broyage, elle est tamisée au tamis normalisé AFNOR de 0.4 mm. Ce procédé a pour but d'enlever les impuretés, les balle de riz incuits et surcuits.



Photo 11 : Tamisage de RHA

### **IV-3-2 Caractérisation des RHA :**

#### **a) Caractéristiques physiques :**

Tableau 16 : Caractéristiques physique des RHA

Aspect	Poudre fine
Couleur	Noir-gris
Masse volumique	0.52 Kg/L
Densité	0.52
SSB	1000 m <sup>2</sup> /Kg

Source : Auteur

#### **b) Composition chimique :**

Tableau 17 : Composition chimique des RHA

Constituants	Teneur en %
SiO <sub>2</sub>	93.10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15
CaO	0.44
MgO	0.42
Na <sub>2</sub> O	0.04
K <sub>2</sub> O	2.93
PF	2.93

Source : RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie « Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux »

### **IV-4 LE SABLE :**

Le sable qu'on a utilisé est un sable de rivière approvisionner sur les marchands de sable.

Après approvisionnement elle est juste tamisée au tamis d'ouverture 1mm.

Tableau 18 : Caractéristique physique du sable

Teneur en eau	4.3 %
Masse volumique apparente	1.53 Kg/L

Source : Auteur

## **CHAPITRE V : FORMULATION ET FABRICATION DES EPROUVETTES**

Dans ce chapitre, on va essayer de trouver la formule et la technique pour obtenir les plaques en sciure de bois.

Dans notre étude, le nombre de paramètre est trop élevé, il est alors nécessaire de faire des essais préliminaires pour pouvoir fixer quelques paramètres et réaliser un plan factoriel complet. Pour les paramètres fixe, nous avons choisi la sciure de bois et le sable en raison de leur faible interaction par rapports aux autres matériaux utilisés. Et comme critère, nous avons choisi pour cet essai préliminaire, la résistance à la flexion et la résistance à la compression à 7 jours.

### **V-1 FORMULATION :**

Réponse= Sciure + Sable + Chaux + RHA + Eau

Par tâtonnement, nous avons variée le dosage de la sciure et du sable et le reste a était fixé.

Tableau 19 : Dosage de chaque constituant dans l'essai préliminaire

	Sciure (g)	Sable (g)	Chaux (g)	RHA (g)	Eau (L)
Essai prélim 1	96	120	288	288	0.40
Essai prélim 2	120	96	288	288	0.40
Essai prélim 3	144	72	288	288	0.40
Essai prélim 4	168	48	288	288	0.40

### **V-2 FABRICATION DES EPROUVETTES :**

La préparation des matières premières est déjà faite, voici les étapes suivantes à réaliser.



Figure 19 : Processus de fabrication des échantillons

Les matières premières sont pesées un par un ensuite malaxer ensemble.



Photo 12 : Malaxage des matières premières

Ensuite, vient le moulage.

Le moule utilisé est de taille 4×4×16 cm, excellent pour les essais de tractions et compressions.



Photo 13 : Moule 4×4×16 cm

Lors du moulage, le mélange malaxé est versé dans le moule, suivie de 30 coups au marteau pour chaque échantillon pour qu'il soit bien comprimé. Le démoulage n'est réalisé qu'après 24 heures.



Photo 14 : Epreuves moulées

Les 24 heures terminées, il ne reste plus qu'à les sécher.



Photo 15 : Séchage des éprouvettes

**V-2-1 Résultats résistances à la compression et à la flexion à 7 jours des essais préliminaires :**

Tableau 20 : Résultats des essais préliminaires

	Rc 7j (MPa)	Rf 7j (MPa)
Essai prélim 1	0.101	0.019
Essai prélim 2	0.117	0.013
Essai prélim 3	0.080	0.008
Essai prélim 4	0.109	0.005

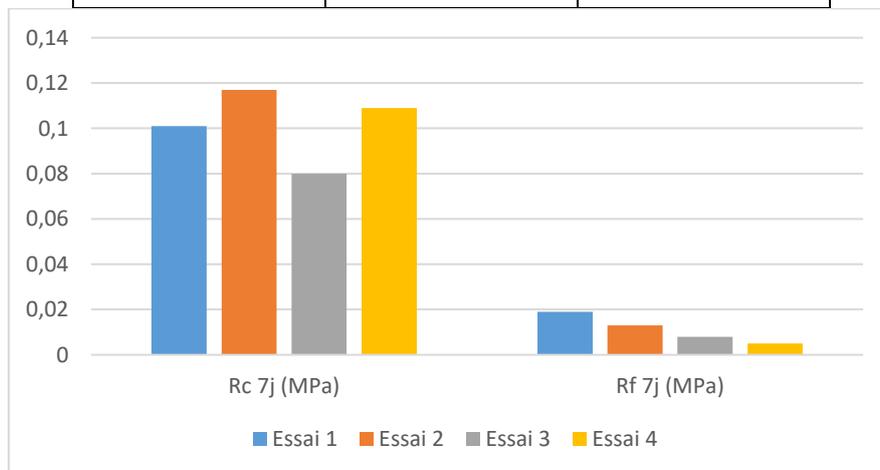


Figure 20 : Rc 7j et Rf 7j des essais préliminaires

**Interprétation :**

L'augmentation de la quantité de la sciure diminue la résistance du matériau. L'essai 1 et 2 ont de bons résultats.

Nous avons choisi le dosage de l'Essai prélim 2 parce qu'elle a la résistance à la compression la plus élevée, et aussi pour le rapport qualité prix. Ces résultats vont être ensuite analysés par plan d'expérience.

## **PARTIE 3 : MODELISATIONS PAR PLAN D'EXPERIENCE**

## **CHAPITRE VI : APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES DANS LE LOGICIEL JMP**

### **VI-1 PERSPECTIVE DE L'ESSAI :**

Lors des essais préliminaires, auquel nous avons varié le dosage de la sciure et du sable, nous avons retenu le dosage de l'essai 2 qui est rappelé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 21 : Rappel dosage de l'essai prélim 2

	Sciure (g)	Sable (g)	Chaux (g)	RHA (g)	Eau (L)
Essai prélim 2	120	96	288	288	0.40

Source : Auteur

Pour la suite, nous allons formuler les matériaux composites par plan factoriel à deux niveaux. Les conditions sont :

- La sciure et le sable deviennent des paramètres fixes, leurs niveaux ne seront plus variés
- Les dosages en chaux et RHA sont ajustés à 20% et 28% chacun suivant les plans factoriels à deux niveaux
- Le dosage de l'eau change aussi car toutes les matières premières utilisés ont une grande capacité à absorbé l'eau, elle va être donc à 30% et 38%.

### **VI-2 NIVEAUX DES FACTEURS :**

Les facteurs ciblés par cette recherche sont la quantité de Chaux, de RHA, et d'Eau utilisé ; le tout par unité de volume à l'état frais.

Le choix des fourchettes des différents paramètres est le résultat d'études bibliographiques et des essais préliminaires réaliser pendant les expérimentations.

Tableau 22 : Paramètres de niveau des facteurs

Constituants	Sciure (g)	Sable (g)	Chaux (g)		RHA (g)		Eau (L)	
Dosage	120	96	240	336	240	336	0.36	0.45
Niveaux	Pas de niveau	Pas de niveau	-1	1	-1	1	-1	1

Source : Auteur

### **VI-3 CHOIX DU PLAN D'EXPERIENCE :**

Avec un plan de trois facteurs à deux niveaux, le nombre d'essai est égal à  $2^3=8$  ; ce nombre est acceptable pour un travail de laboratoire, le plan factoriel complet sera donc le plus adapté à cette étude car il est plus précis.

Plan factoriel complet  $2^3$  (trois facteurs à deux niveaux)

La matrice des effets est une matrice à 8 lignes et 3 colonnes selon le plan factoriel.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

Figure 21 : Matrice des effets

### **Interactions**

Pour le plan factoriel (Chaux, RHA, Eau), les interactions sont les suivantes : Chaux\*RHA, Chaux\*Eau, RHA\*Eau, Chaux\*RHA\*Eau

Nous avons 4 interactions, 3 facteurs et 8 essais à réaliser ; nous obtenons une matrice de 8 lignes et 7 colonnes.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix}$$

Figure 22 : Matrice des effets avec ses interactions

#### **VI-4 FORMULATION SUIVANT LA MATRICE DES EFFETS :**

La matrice des effets nous donne les formules suivantes :

Tableau 23 : Formule du matériau par plan d'expérience

	Sciure (g)	Sable (g)	Chaux (g)	RHA (g)	Eau (L)
Essai 1	120	96	240	240	0.36
Essai 2	120	96	336	240	0.36
Essai 3	120	96	240	336	0.36
Essai 4	120	96	336	336	0.36
Essai 5	120	96	240	240	0.45
Essai 6	120	96	336	240	0.45
Essai 7	120	96	240	336	0.45
Essai 8	120	96	336	336	0.45

Source : Auteur

#### **VI-5 RESULTATS ET MODELISATION :**

##### **VI-5-1 Résultats et modélisation des essais mécaniques à 7 jours :**

###### **a) Résultats des essais mécaniques à 7 jours :**

Le tableau suivant représente le résultat des essais mécaniques à 7 jours réalisé sur les échantillons. Les tests effectués sont :

-résistance à la compression à 7 jours (Rc07)

-résistance à la flexion à 7 jours (Rf07)

Tableau 24 : Résultats Rc07 et Rf07

Essai	Rc07 (MPa)	Rf07 (MPa)
Essai 1	0.231	0.016
Essai 2	0.228	0.060
Essai 3	0.219	0.040
Essai 4	0.129	0.007
Essai 5	0.139	0.030
Essai 6	0.179	0.081
Essai 7	0.237	0.069
Essai 8	0.212	0.014

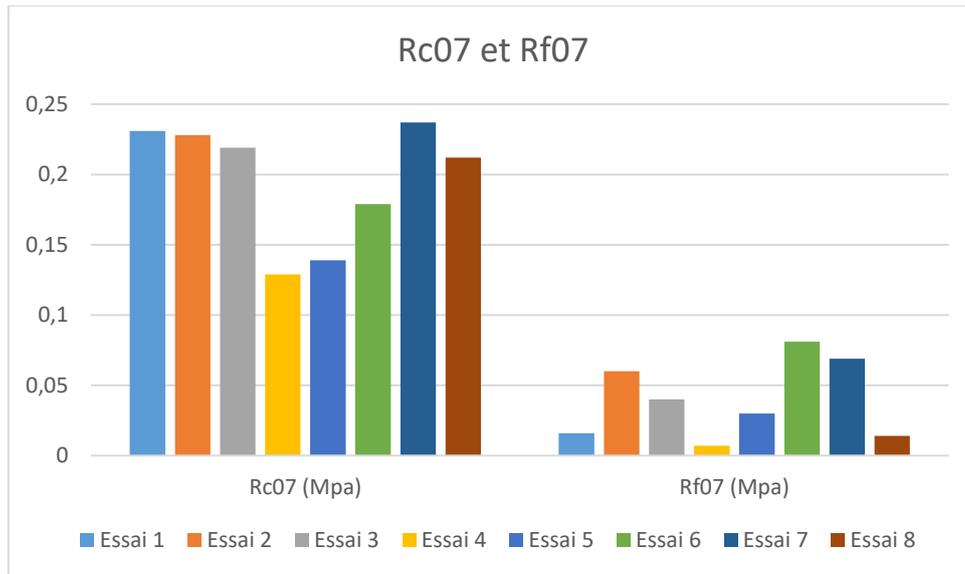


Figure 23 : Résultats Rc07 et Rf07

**b) Conception des plans d'expériences par le logiciel JMP :**

Les plans d'expériences (DOE) constituent une méthode d'analyse simultanée des effets produits par plusieurs variables sur une variable de résultat (réponse).

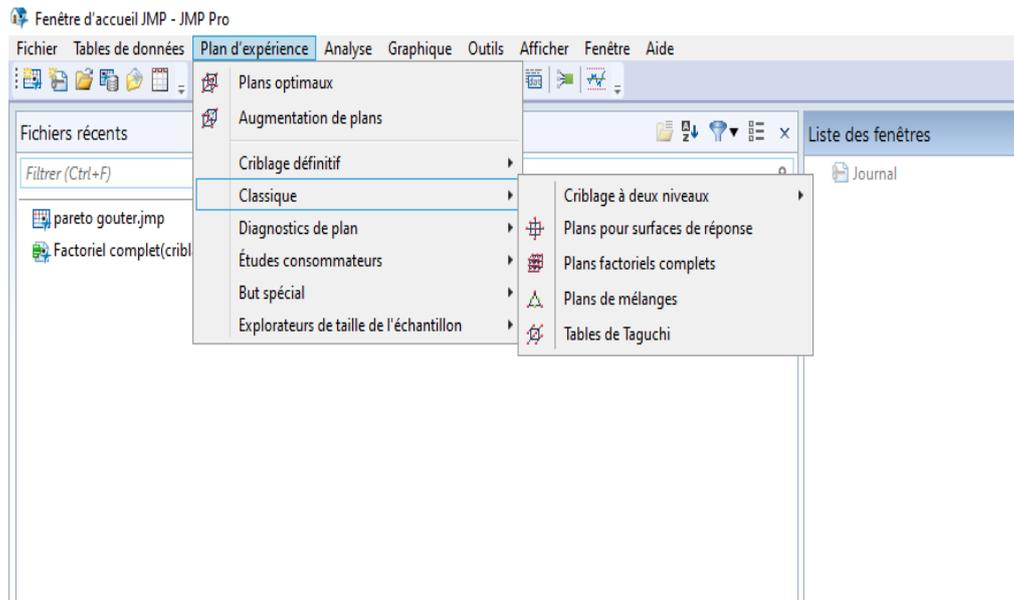
Ces expériences consistent en une série d'essais ou de tests au cours desquels les variables d'entrée ou les facteurs sont intentionnellement modifiés et dont les données sont recueillies à la fin de chaque essai.

JMP possède 4 types de plan d'expérience : plans pour surfaces de réponse, plans factoriels complets, plans de mélanges et les tables de Taguchi. Les étapes à suivre pour la création, l'analyser et traçage un plan d'expériences sont similaires pour tous les types de plans. Une fois que nous avons effectué l'expérience et saisi les résultats, JMP met à disposition ses outils d'analyse et traçage pour expliquer clairement les résultats surtout avec l'aide des graphiques.

- **Création d'un plan d'expérience :**

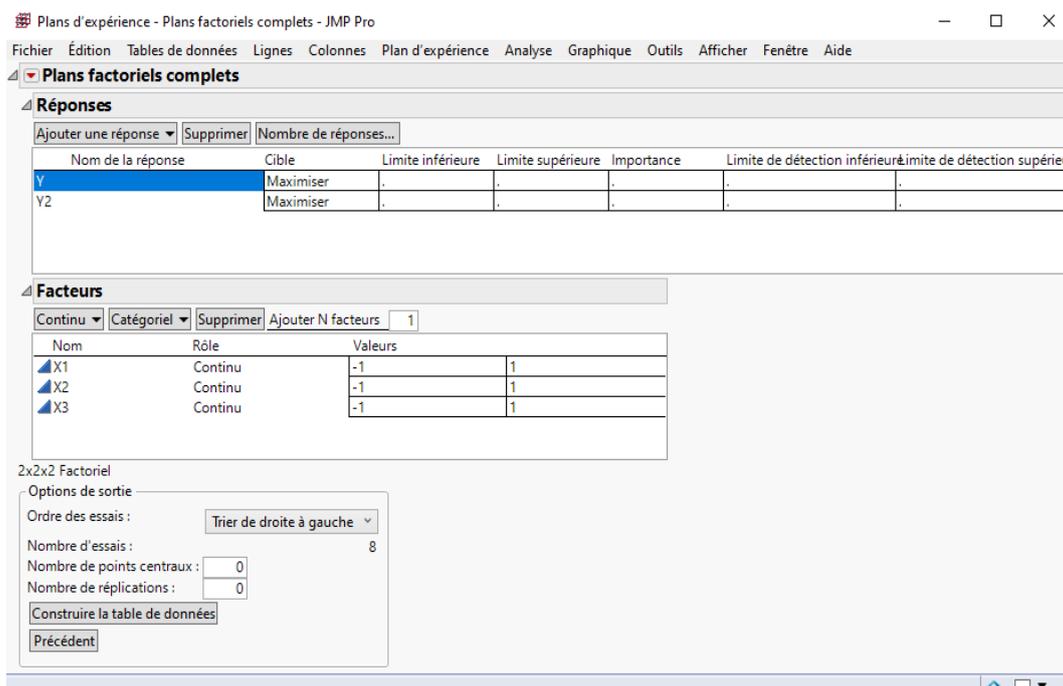
Pour créer un plan d'expérience dans JMP, il suffit d'en choisir un qui nous convient et JMP se charge de l'enregistrer automatiquement et crée une feuille de travail pour notre étude. Les étapes à suivre sont :

-cliquer sur Plan d'expérience→Classique→Plans factoriels complets



**Photo 16 : Choix d'un plan dans JMP**

Après avoir sélectionné le plan voulu, il faut construire le tableau JMP en donnant le nombre de réponses et de facteurs utilisés.



**Photo 17 : Construction de la table de données**

Appuyez ensuite sur la touche "Construire la table de données" et on obtient la table qu'il faudra remplir les cases un à un. Concernant la case des réponses Rc07 et Rf07, les données à entrées sont les résultats des essais mécaniques qui ont été effectuées.

The image shows two screenshots of the JMP Pro software interface. The top screenshot shows a data table with columns: Configuration, X1, X2, X3, Y, and Y2. The bottom screenshot shows the same table with additional columns: Chaux, RHA, Eau, Rc07, and Rf07. The data is as follows:

Configuration	X1	X2	X3	Y	Y2	Chaux	RHA	Eau	Rc07	Rf07
1 ---	-1	-1	-1			-1	-1	-1	0,231	0,016
2 +--	1	-1	-1			1	-1	-1	0,228	0,06
3 --+	-1	1	-1			-1	1	-1	0,219	0,04
4 +++	1	1	-1			1	1	-1	0,129	0,007
5 ---	-1	-1	1			-1	-1	1	0,139	0,03
6 ++-	1	-1	1			1	-1	1	0,179	0,081
7 -++	-1	1	1			-1	1	1	0,237	0,069
8 +++	1	1	1			1	1	1	0,212	0,014

Photo 18 : Table de données avant et après être remplie

- Analyse d'un plan :

La table des données étant remplie correctement, l'étape suivante à suivre est l'analyse du plan. Pour le faire, il faut cliquer sur :

-Analyse→Modèle linéaire

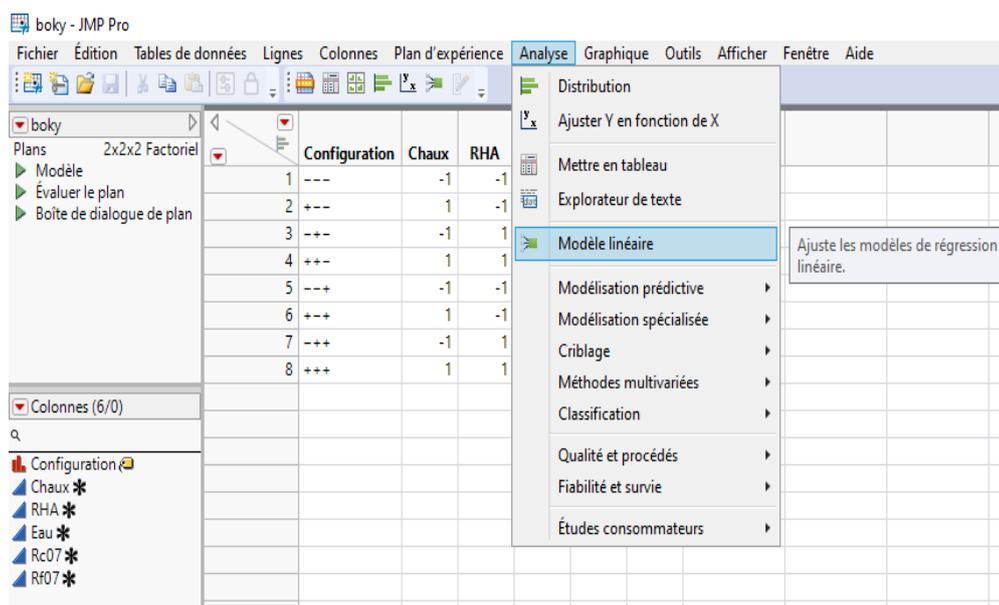


Photo 19 : Analyse du plan

Après il y a une petite fenêtre de construction du modèle qui s'ouvre et il ne reste plus qu'à appuyer sur "Exécuter".

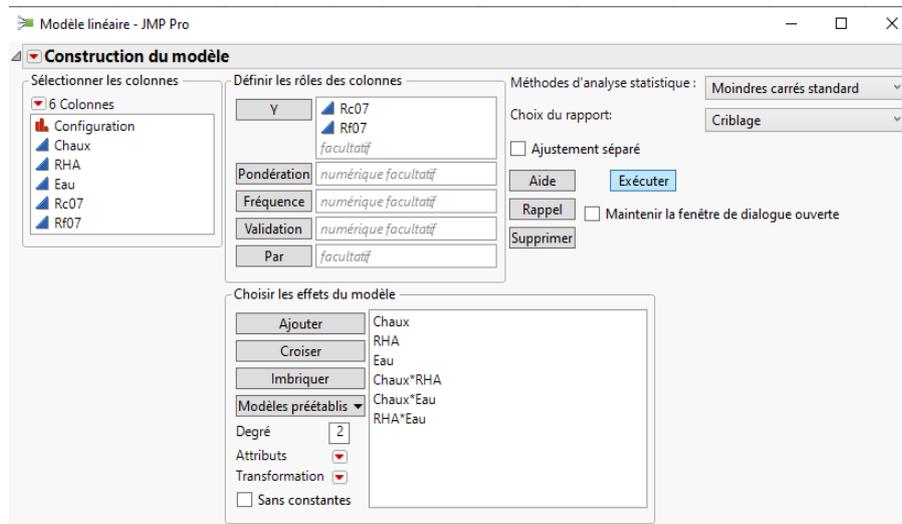


Photo 20 : Exécution de l'analyse

- **Interprétation :**

- **Modèles mathématiques des essais mécaniques :**

Elles s'écrivent des manières suivantes :

$$Rc07 = A_0 + A_1 \cdot \text{Chaux} + A_2 \cdot \text{RHA} + A_3 \cdot \text{Eau} + A_{12} \cdot \text{Chaux} \cdot \text{RHA} + A_{13} \cdot \text{Chaux} \cdot \text{Eau} + A_{23} \cdot \text{RHA} \cdot \text{Eau}$$

$$Rf07 = A_0 + A_1 \cdot \text{Chaux} + A_2 \cdot \text{RHA} + A_3 \cdot \text{Eau} + A_{12} \cdot \text{Chaux} \cdot \text{RHA} + A_{13} \cdot \text{Chaux} \cdot \text{Eau} + A_{23} \cdot \text{RHA} \cdot \text{Eau}$$

- **Coefficients codés :**

La détermination des coefficients  $A_i$ ,  $A_{ij}$  des valeurs codées -1 et +1 de Rc07 et Rf07 se font par le Logiciel JMP 16 et nous avons les résultats présentés par les tableaux suivants :

Tableau 25 : Tableau donnant les coefficients  $A_i$ ,  $A_{ij}$  du modèle Rc07

Terme	Estimation des coefficients codés
Constante	0,19675
Chaux	-0,00975
RHA	0,0025
Eau	-0,005
Chaux*RHA	-0,019
Chaux*Eau	0,0135
RHA*Eau	0,03025

**Tableau 26 :** Tableau donnant les coefficients Ai, Aij du modèle Rf07

Terme	Estimation des coefficients codés
Constante	0,039625
Chaux	0,000875
RHA	-0,007125
Eau	0,008875
Chaux*RHA	-0,022875
Chaux*Eau	-0,001875
RHA*Eau	0,000125

Source : Auteur

**- Modèle mathématique retenu en unités codées -1 et +1 :**

Les modèles mathématiques des valeurs codées -1 et +1 des essais mécaniques à 7 jours sont :

$$Rc07 = 0,19675 - 0,00975*Chaux + 0,0025*RHA - 0,005*Eau - 0,019*Chaux*RHA + 0,0135*Chaux*Eau + 0,03025*RHA*Eau$$

$$Rf07 = 0,039625 + 0,000875*Chaux - 0,007125*RHA + 0,008875 - 0,022875*Chaux*RHA - 0,001875*Chaux*Eau + 0,000125*RHA*Eau$$

**- Récapitulatif du modèle :**

**Tableau 27 :** Tableau récapitulatif du calcul de R carré du modèle

	Rc07	Rf07
R carré	0,99525	0,980394
R carré ajusté	0,966752	0,862758
Racine de l'erreur quadratique moyenne	0,007778	0,010253
Moyenne de la réponse	0,19675	0,039625
Observations (ou sommes pondérées)	8	8

Source : Auteur

Nous avons des valeurs de R carré élevées, nous pouvons dire que notre nouveau modèle de Rc07 et Rf07 sont des modèles de qualité.

**- Test de significatif :**

La signification des coefficients des facteurs et des interactions est déterminée suivant la valeur obtenue de « q ». Les valeurs qui montrent les significatifs des modèles selon les plans d'expérience en 2003 sont représentées comme suit :

- $q \leq 0.01$  très significatif ;
- $q \leq 0.05$  significatif ;

- $q \leq 0.1$  peu significatif ;
- $q > 0.1$  très peu à non significatif.

Dans un tableau ANOVA (Analysis Of Variance), les facteurs dont la valeur de p est inférieure à 0,1 sont statistiquement significatifs. Si le tableau ANOVA de ce modèle ne comprend aucune valeur de p, cela s'explique par l'absence de degrés de liberté pour l'erreur une fois l'ensemble de nos facteurs inclus dans le modèle.

Or, nous avons besoin d'au moins 1 degré de liberté pour calculer les valeurs de p. Toutefois, si nous ne pouvons pas accepter ce modèle sur la base des résultats de l'ANOVA, nous pouvons utiliser la droite de Henry ou le diagramme de Pareto pour identifier les facteurs et les interactions non significatifs.

C'est pour cela que j'ai négligé l'interaction d'ordre 3.

Tableau 28 : Tableau d'estimation des coefficients codés de Rc07

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Constante	0,19675	0,00275	71,55	0,0089*
Chaux	-0,00975	0,00275	-3,55	0,1750
RHA	0,0025	0,00275	0,91	0,5303
Eau	-0,005	0,00275	-1,82	0,3201
Chaux*RHA	-0,019	0,00275	-6,91	0,0915
Chaux*Eau	0,0135	0,00275	4,91	0,1279
RHA*Eau	0,03025	0,00275	11,00	0,0577

Source : Auteur

Tableau 29 : Tableau d'estimation des coefficients codés de Rc07

Terme	Estimation des coefficients codés	Erreur standard	t ratio	Prob. >  t
Constante	0,039625	0,003625	10,93	0,0581
Chaux	0,000875	0,003625	0,24	0,8492
RHA	-0,007125	0,003625	-1,97	0,2996
Eau	0,008875	0,003625	2,45	0,2469
Chaux*RHA	-0,022875	0,003625	-6,31	0,1001
Chaux*Eau	-0,001875	0,003625	-0,52	0,6961
RHA*Eau	0,000125	0,003625	0,03	0,9781

Source : Auteur

D'après ces tableaux, seul le coefficient de la constante a été très significatif ; les coefficients des interactions "Chaux\*RHA et RHA\*Eau" ont été significatif pour **Rc07** et "Chaux\*RHA" pour **Rf07**, on peut donc dire que ces interactions ont une grande influence sur la résistance mécanique du matériau. Le reste a été peu significatif.

- **Droite de Henry des effets normalisés :**

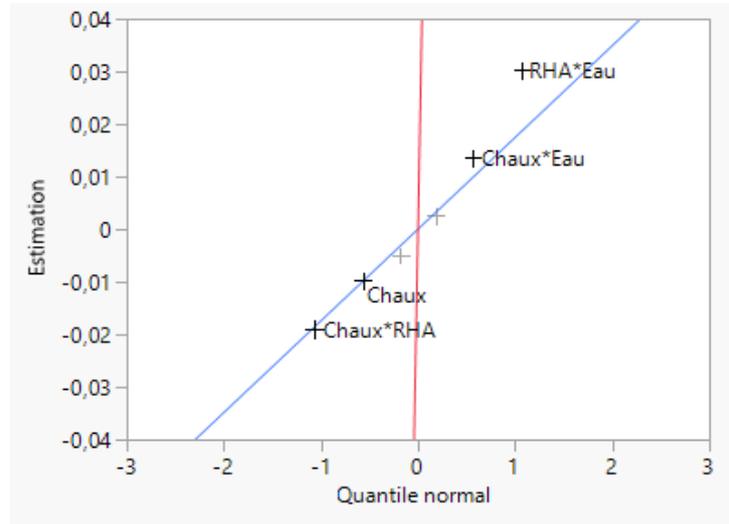


Figure 24 : Droite de Henry des effets normalisé du Rc07

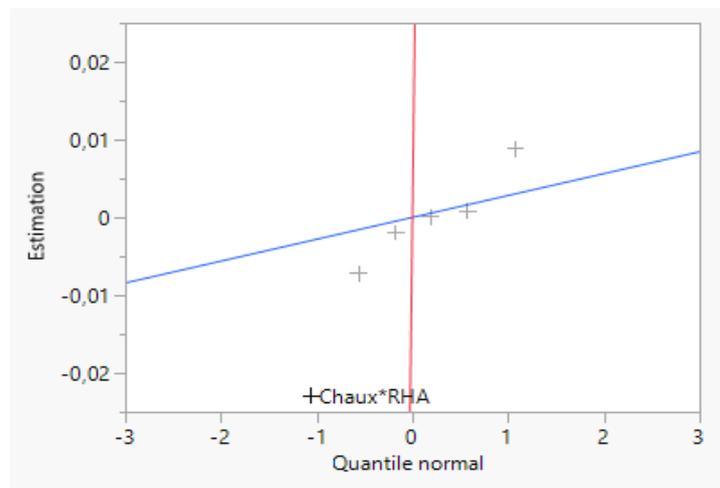


Figure 25 : Droite de Henry des effets normalisé du Rf07

- **Diagramme de PARETO des effets du modèle :**

Terme	Estimation
RHA*Eau	0,0302500
Chaux*RHA	-0,0190000
Chaux*Eau	0,0135000
Chaux	-0,0097500
Eau	-0,0050000
RHA	0,0025000

Figure 26 : Diagramme de PARETO des effets du modèle Rc07

Terme	Estimation
Chaux*RHA	-0,0228750
Eau	0,0088750
RHA	-0,0071250
Chaux*Eau	-0,0018750
Chaux	0,0008750
RHA*Eau	0,0001250

Figure 27 : Diagramme de PARETO des effets du modèle Rf07

- Influences des effets des facteurs :

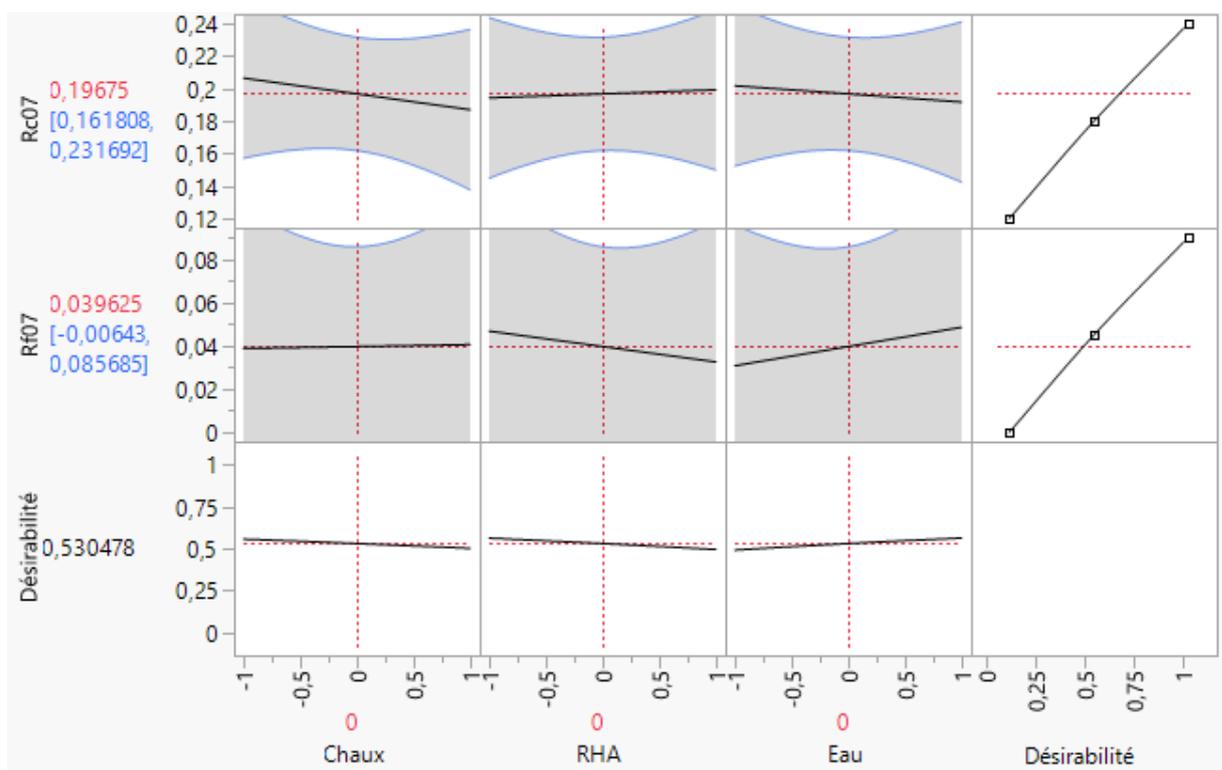


Figure 28 : Influence des effets de facteurs

Pour Rc07, d'après cette figure, les facteurs principaux ont peu d'effets par rapport à la résistance, à part la chaux, sauf que son effet est négatif d'où son coefficient devient négatif. L'augmentation de volume de RHA dans le mélange serait bénéfique, mais ce n'est pas le cas pour la Chaux et l'Eau.

Et pour Rf07, la Chaux n'a presque pas d'effet sur la résistance, pas comme la Chaux qui a un effet négatif et l'Eau qui a un effet positif.

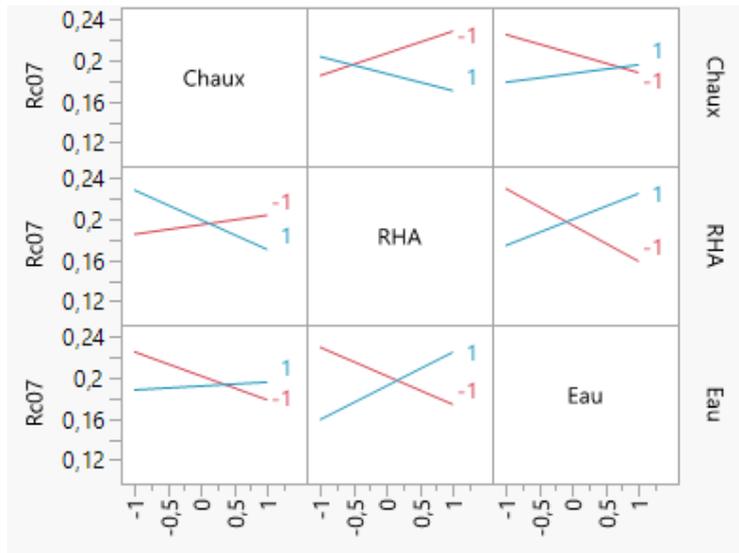


Figure 29 : Influences des effets d'interaction dans Rc07

D'après ce graphique, toutes les interactions influent sur la réponse du model, mais les interactions de Chaux\*RHA et RHA\*Eau sont les plus influent dans ce mélange.

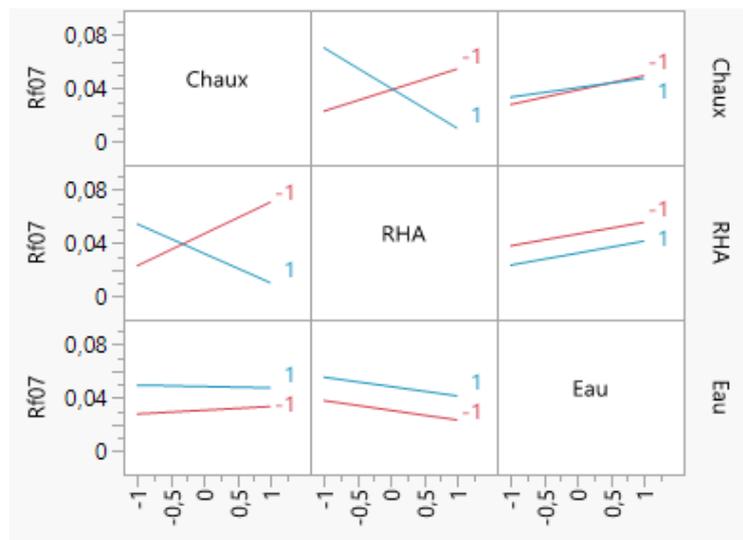


Figure 30 : Influences des effets d'interaction dans Rf07

En revanche pour Rf07, seul l'interaction Chaux\*RHA influe sur le model.

Nous avons analysé les graphes du contour suivant en fixant le dosage RHA=0. L'objectif est de regarder l'influence du RHA sur la résistance en compression.

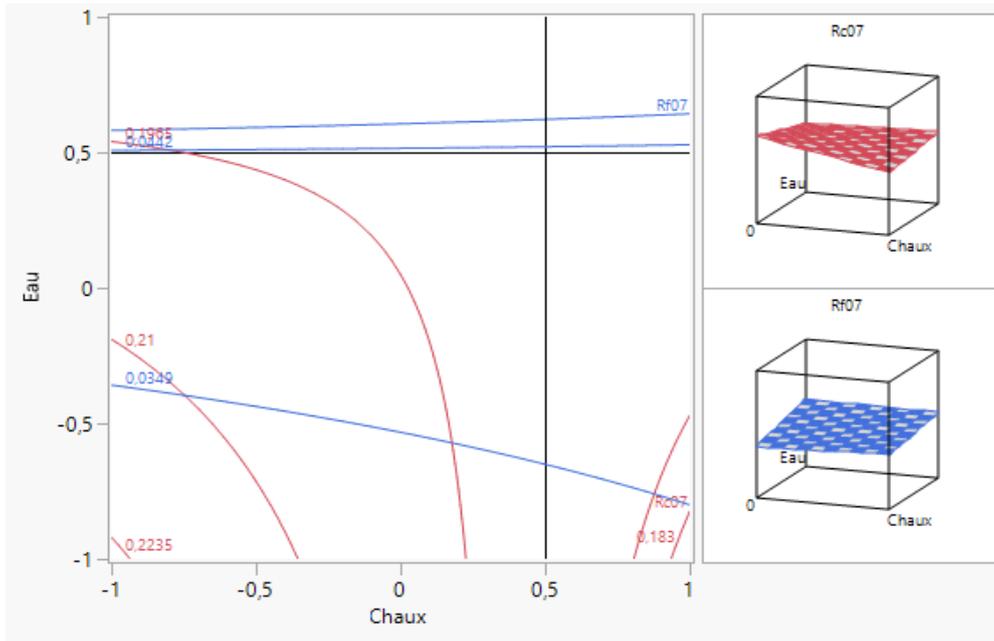


Figure 31 : Iso-réponse en fonction du dosage du Chaux et de l'Eau (RHA=0)

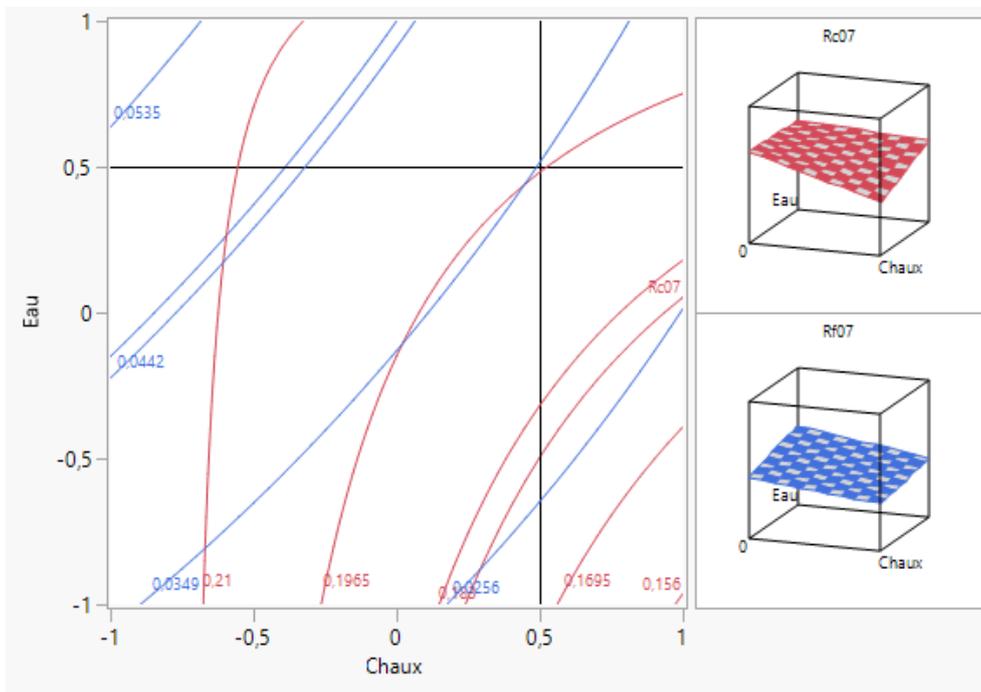


Figure 32 : Iso-réponse en fonction du dosage du Chaux et de l'Eau (RHA=0.5)

Dans la Figure 31, le dosage de RHA=0 et dans la Figure 6 le RHA=0.5 (valeur codées). Les dosages de Chaux de l'Eau sont fixés (Eau=0.5 ; Chaux=0.5).

Et d'après les figures ci-dessus, l'augmentation de RHA dans le mélange améliore la résistance en compression mais diminue la résistance à la flexion.

### c) Optimisation du mélange :

Nous allons utiliser l'optimisation des réponses pour identifier la combinaison des paramètres de facteurs qui nous donnera le meilleur résultat possible.

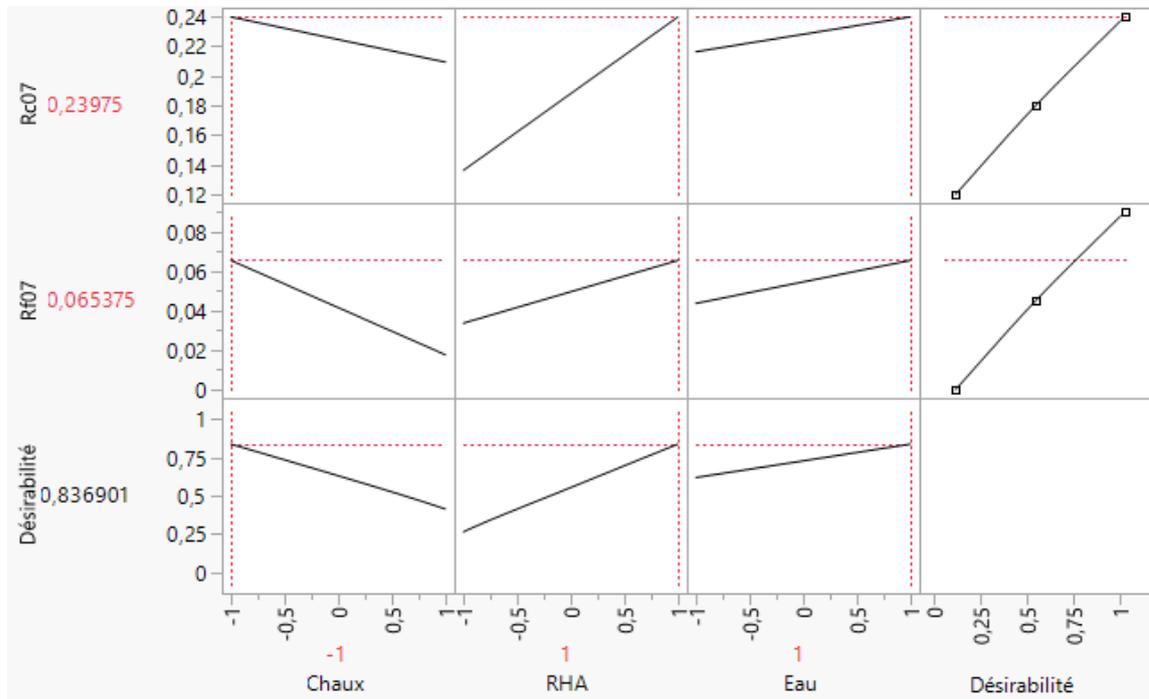


Figure 33 : Profileur de prévision après optimisation

Après l'optimisation du modèle, le profileur nous montre les valeurs prévues pour obtenir une résistance maximale à 7jours :

- Chaux = -1
- RHA = 1
- Eau = 1

Ces dosages de chaque constituant nous permettent d'avoir une résistance optimale de  $R_{c07} = 0.23975$  MPa et  $R_{f07} = 0.065375$  MPa. Le mélange à avoir eu ce résultat est l'échantillon numéro 7.

#### - **Conclusion partielle :**

Nous avons depuis le début négligé l'interaction d'ordre 3 car le calcul de  $S^2$  serait impossible puisque  $n=p$  ( $n$ =nombre d'expérience réalisé et  $p$ =nombre de coefficient du model), la réalisation d'un plan complet serait inespéré.

Nos modèles mathématiques des valeurs codées -1 et +1 sont :

$$Rc07 = 0,19675 - 0,00975*Chaux + 0,0025*RHA - 0,005*Eau - 0,019*Chaux*RHA + 0,0135*Chaux*Eau + 0,03025*RHA*Eau$$

$$Rf07 = 0,039625 + 0,000875*Chaux - 0,007125*RHA + 0,008875*Eau - 0,022875*Chaux*RHA - 0,001875*Chaux*Eau + 0,000125*RHA*Eau$$

Les tests de significatif nous a démontré que les interactions RHA\*Eau et Chaux\*RHA (les deux premiers éléments les plus élevés dans le diagramme de PARETO) sont les plus grands responsables de la variation de la résistance en compression des à 7 jours et Chaux\*RHA pour celui de la résistance à la flexion à 7 jours.

Néanmoins, il ne faut pas négliger la variation des trois facteurs car d'après les graphiques d'iso-réponses on peut obtenir le même résultat avec des différents dosages à chaque mélange de la Chaux, du RHA et d'Eau.

#### **VI-5-2 Résultats d'autres essais physiques :**

##### **a) Masse volumique et Teneur en eau :**

Elles sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 30 : Masse volumique et Teneur en eau

<b>Essai</b>	<b>Masse volumique (Kg/L)</b>	<b>Porosité (%)</b>
Essai 1	0.924	53.78
Essai 2	0.986	50.62
Essai 3	0.832	60.43
Essai 4	1.041	59.06
Essai 5	0.997	48.39
Essai 6	0.917	46.43
Essai 7	0.925	42.65
Essai 8	0.951	46.58

Source : Auteur

On peut constater que plus ils sont denses et compacts, moins ils sont poreux.

**b) Test de dureté :**



Photo 21 : Test de dureté

Après immersion des échantillons dans l'eau pendant 24 heures, on les gratte à l'ongle et on constate qu'elles sont dures car il n'y a pas de rayure.

Dans l'échelle de Mohs, elles sont de dureté 4, elles se raient facilement avec un couteau. Même si elles sont dures, elles restent tout de même cassantes.

**c) Test de vissage, clouage, sciage :**



Photo 22 : Vissage, clouage et sciage

Les opérations de vissage, clouage et sciage ont été effectuées facilement sans trop de difficulté.

d) **Test au feu :**



Photo 23 : Test au feu

Après passage au feu des échantillons pendant 5 minutes, on constate qu'ils sont de classe B-S2, c'est dire qu'elles résistent à une attaque de flamme tout en limitent la propagation des flammes ; suivie de petites dégagement de fumée.

e) **Adhérence :**

On a fait plusieurs tests pour ce cas si.

- **Adhérence à la peinture et vernis**



Photo 24 : Adhérence aux peintures et vernis

Il s'adhère bien au différents types de peintures et vernis.

- **Adhérence au silicate de soude**



Photo 25 : Adhérence au silicate de soude

Elle adhère bien le silicate de soude.

- **Adhérence aux enduits de ciment et plâtre**



Photo 26 : Adhérence aux enduits de ciment et plâtre

Les enduits de ciment et plâtre se fixent bien sur le matériau.

- Adhérence aux colles



Photo 27 : Adhérence aux colles

On a utilisé de la colle époxy et colle fox utilisé pour coller sur différents supports, et il s'avère qu'ils se collent bien sur le matériau.

#### **IV-5-3 Fabrication du model après optimisation :**

Rappelons que pour ce model optimisé, nous avons sélectionné l'essai 7.

- Chaux = -1
- RHA = 1
- Eau = 1

Le procédé est toujours le même sur le pesage et mélangeage ; mais pour le moulage, nous avons utilisé une moule à brique (22×11×7) qui est pressé par une presse hydraulique avec une charge de 2000 DaN.

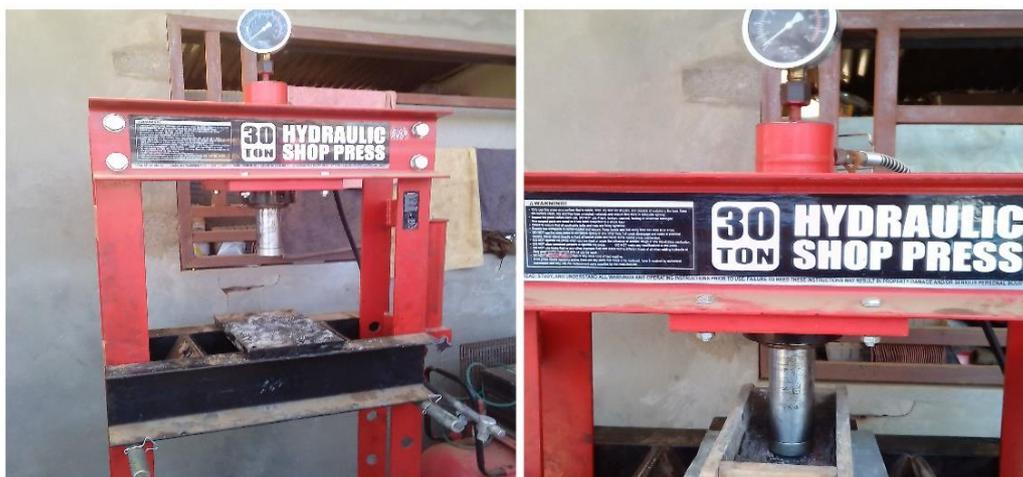


Photo 28 : Pressage avec la presse hydraulique

Après se poursuit le démoulage et le laisser sécher à l'abris du soleil.



Photo 29 : Echantillon optimisée

**Résumé de ces propriétés et caractéristiques :**

- Couleur gris comme un ouvrage en ciment, légère, agréable au toucher
- Résistance à la compression à 28 jours  $R_{c28} = 1.12$  MPa
- Résistance à la flexion à 28 jours  $R_{f28} = 0.306$  MPa
- Masse volumique 0.925 Kg/L, porosité 42.65%
- Résiste à l'eau et limite la propagation de flamme (classe B-S2)
- Elle est isolante acoustique mais aussi thermique avec une résistance thermique  $R = 1.21$  m<sup>2</sup>/°C.W

**PARTIE 4 : APPROCHE ECONOMIQUE ET  
ENVIRONNEMENTALE**

## CHAPITRE VII : ETUDES DE PRIX

Pour mettre en valeur notre recherche, nous allons étudier les coûts de la confection des plaques. Nous étudions dans les tableaux suivants ses prix unitaires en détaillant les coûts des matériaux et les coûts de main-d'œuvre et les couts des matériels nécessaires (en Ariary).

### V-I LE COUT DE 1 m<sup>2</sup> DE PLAQUE :

Nous allons faire les devis matériaux, matériels et main d'œuvre pour la confection de 1 m<sup>2</sup> de plaque.

Tableau 31 : Cout de 1 m<sup>2</sup> de plaque

<b>1 m<sup>2</sup> de plaque</b>							
<b>Désignations</b>	<b>U</b>	<b>Quanti- tés</b>	<b>Prix Unitaires (Ar)</b>	<b>Matéria -ux</b>	<b>Main d'Œuvre</b>	<b>Matériel</b>	<b>Total</b>
<b>A- MATERIAUX</b>							
Sciure	m <sup>3</sup>	0.0004	800	0.32			
Sable	m <sup>3</sup>	0.0001	30 000	3			
Chaux	Kg	0.56	800	448			
RHA	Kg	0.78	80	62.4			
Eau	m <sup>3</sup>	1.06	1250	1325			
TOTAL MATERIAUX							1838.72
<b>B- MAIN D'ŒUVRE</b>							
Ouvrier	j	1	10000 (×2)		20000		
TOTAL MAIN D'ŒUVRE							20000
<b>C- MATERIEL</b>							
Presse	h	0.5	8000			4000	
Broyeur	h	1	8000			8000	
Malaxeur	h	0.25	8000			2000	
Cribleur	h	0.25	8000			2000	

Outillage d'ouvrier	U	1	50000			30000	
<b>TOTAL MATERIEL</b>							46000
<b>TOTAL</b>							67839

Source : Auteur

Donc le cout de la confection de 1 m<sup>2</sup> de plaque est de 67900 Ariary.

Si on compare son prix par rapport au plaque formé avec des résines polymères, qui sont en moyennes 160000Ariary ; notre plaque est plus rentable.

## **CHAPITRE VIII : APPROCHE ENVIRONNEMENTALES**

La valorisation des sciures de bois qui sont des déchets encombrants et aussi la substitution du ciment pour crée un nouveau matériau font parties des objectifs de cette étude.

L'étude d'impact sur l'environnement consiste surtout à analyser les risques d'incidences environnementales sur un projet. D'après les analyses faites, on pourra contrer ou minimiser les impacts négatifs sur l'environnement jusqu'à des niveaux acceptables.

Elle est donc une approche préventive et proactive sur la gestion et protection de l'environnement. Il existe 2 catégories d'impacts :

- Impact négatif
- Impact positif

### **VIII-1 IMPACTS NEGATIVES :**

#### **VIII-1-1 Impacts durant la fabrication des plaques :**

Certaines opérations pratiquées pendant la fabrication peuvent être néfaste pour l'environnement.

Les étapes liées à la fabrication sont : fabrication de la chaux, transformation des balles de riz, manipulation des éléments poudreux.

- **Impact lors de la fabrication de la chaux :**

La fabrication de la chaux faite par les usines nécessite une extraction dans des carrières, la cuisson et l'extinction de la chaux aussi qui provoque le dégagement CO<sub>2</sub> très importante dans l'atmosphère.

- **Impact lors de la transformation de la balle de riz :**

La cuisson de la balle de riz génère une émission de CO<sub>2</sub> accompagné d'une odeur de brulé.

Le broyage de la cendre de la balle de riz entraine des bruits perturbants.

- **Impact due à la manipulation des éléments poudreux :**

Le tamisage des éléments poudreux tels la CBR, la chaux, la sciure provoque la pollution de l'air due à la poussière. Ces émissions peuvent provoquer des maladies respiratoires pour les êtres humains que pour les animaux qui habitent aux alentours. En plus de la pollution de l'air,

leurs utilisations aussi peuvent polluer le sol dû par le différent composant minéralogique de chaque produit.

### **VIII-1-2 Les mesures de prévention et d'atténuation :**

Pour préserver l'équilibre environnemental, des mesures de prévention sont nécessaires afin de réduire les impacts négatifs.

Tableau 32 : Les mesures de prévention et d'atténuation

<b>Pollutions</b>	<b>Origines</b>	<b>Mesures d'atténuations</b>
Bruits	Broyages	-Isoler l'unité de broyage -Porter des bouches d'oreilles
Poussières	Tamisages, malaxages	-Porter des matériels de protections adéquats -Mettre un système anti-poussiéreux
Fumées et odeurs	Cuisson de la chaux et de la balle de riz	-Planter des arbres -Filtrer les fumées -Porter des protections adéquats -La cuisson doit se faire loin des habitations

Source : Auteur

### **VIII-2 IMPACTS POSITIFS :**

- **Nouveau concept :**

Matériau écologique par valorisation de déchet presque en fin de cycle de vie, et aussi économique par substitution du ciment par la chaux. De plus la plupart des matériaux à base de sciure de bois ont des matrices organiques, or celui-ci est à matrice minérale, plus sain pour la santé et à faible cout.

- **Bilan de CO<sub>2</sub> :**

La sciure est aussi utilisée comme ajout à la balle de riz pour la cuisson des briques, donc lui trouver une nouvelle utilisation peut réduire l'émission de gaz à effet de serre.

## CONCLUSION GENERALE

A l'issue de ces recherches sur la formulation et modélisation des performances de ce matériau, les études nous ont mener à la possibilité d'exploitation des déchets provenant des scieries pouvant être un pilier dans la préservation de l'environnement.

Il a été démontré par les test effectué que la plaque à base de sciure de bois est un matériau dur, légère, possédant des pores pour respirer et agréables au toucher. Il est donc durable et ne risque pas de pourrir, il limite la propagation des flammes et résiste à l'eau en plus d'être un bon isolant acoustique et thermique ; il s'adhère à n'importe quel type de colle, d'enduit et de peinture parfait pour les traitements de surfaces ; il est aussi économique car les matières premières utilisés sont à bas prix et certaines résultent de la valorisation de déchets.

On peut donc utiliser les plaques comme :

- Plaque préfabriquée pour plafond, cloison pour séparation
- Plaque parement pour décoration murale
- Isolant ou correcteur acoustique

Notons quand même que même si elle est dur, elle ne peut pas transporter de charge importante, mais on pourra facilement le renforcer par d'autre méthode comme par exemple les plans de mélanges.

Les plans factoriels complets à deux niveaux nous ont conduits à réaliser 8 essais de formulation au laboratoire pour un maximum d'informations très précises. Ces plans offrent également un cadre de modélisation rigoureux et leur mise en œuvre ne nécessite que des connaissances mathématiques élémentaires. Des outils statistiques comme le test de Student et le test de Fischer sont exploités pour valider ses modèles mathématiques.

On a 2 modèles mathématiques sur les résistances à la compression à 7 jours et résistances à la flexion à 7 jours avec des valeurs codées grâce au logiciel JMP Pro 16, l'application DOE – plans factoriels complet à 2 niveaux :

$$\mathbf{Rc07 = 0,19675 - 0,00975*Chaux + 0,0025*RHA - 0,005*Eau - 0,019*Chaux*RHA + 0,0135*Chaux*Eau + 0,03025*RHA*Eau}$$

$$\mathbf{Rf07 = 0,039625 + 0,000875*Chaux - 0,007125*RHA + 0,008875 - 0,022875*Chaux*RHA - 0,001875*Chaux*Eau + 0,000125*RHA*Eau}$$

JMP Pro 16 possède plusieurs outils pour faciliter l'interprétation des résultats. Comme par exemple :

Lors des essais il a été vu que le RHA influe beaucoup sur la résistance mécanique du matériau par ses interactions qu'on peut vérifier dans le diagramme de PARETO.

Les différents points illustrés dans la droite de Henry sont assez éloignés, ils nous montrent que c'est un modèle de qualité car les calculs seront plus précis dans l'analyse de variance.

Le graphe de contour est parfait pour la prédiction et en plus il nous à montrer l'importance du RHA dans le mélange qui influe beaucoup sur la résistance mécanique.

On peut obtenir des modèles à notre guise, qu'il soit performant, ou économique, ou bien les deux à la fois tout en évitant d'autres nombreux essais pour obtenir un dosage optimum.

Bref, les résultats obtenues sur la nouvelle formulation de ce matériau composite offre une nouvelle opportunité à la valorisations des déchets de scieries pour l'amélioration de notre environnement.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] : ANDRIANTSITOHAINA Faly Fiononana José- Contribution à la fabrication des matériaux composite à base de balle de riz et des déchets plastiques. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, présenté en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur (2015)
- [2] : RANDRIANARINIAINA Rinah- Fabrication de panneau en matériaux composites à base de balle de riz et de résine. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, présenté en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur (2019)
- [3] : ANDRIAMAMPIHONONA Mirianno- Tissage de la fibre de sisal en vue d'utilisation comme renfort dans les matériaux. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, présenté en vue d'obtention du diplôme de License (2018)
- [4] : Ny AINA Zo Nirina-Valorisation des déchets lignocellulosiques : balle de riz et sciure de bois. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Présenté en vue de l'obtention de diplôme de Licence (2018)
- [5] : RAZAFIMANANTSOA Onjaniaina-Conception d'une unité de production de matériaux de construction et de briquettes combustibles à partir des sciures de bois sise à Antsirabe. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur (2014)
- [6] : RAHELIARIVELO Tsanta-Contribution à l'étude de fabrication de matériaux composites à base de sciure de bois et de ciment portland. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Etude Approfondie en Sciences des Matériaux (2004)
- [7] : Pantea OMRANI-Amélioration et nouvelle technologie de soudage linéaire et rotatif du bois. Université Henri Poincaré, Présenté en vue d'obtention du diplôme de Docteur (2009)
- [8] : Propriété physiques des bois
- [9] : RABETANETY Léon Patrick-Etude et essai de fabrication de peinture minéral par le procédé de géopolymérisation. Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra, Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur (2021)
- [10] : Docteur RATSIMBAZAFY Hery Mikaela-Cours sur la technique de mise en œuvre et production de chaux. Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra (2019)
- [11] : RAHELIARIMANANA Tolojanahary Lucie-Valorisation des cendres de balle de riz pour la production des liants minéraux. Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo, présenté en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur (2019)

[12] : RANOROMIHANTA Mahefamalala Tantely-Etude et fabrication de quelques enduits de finition et décoratifs

[13] : RADOELIZO Seheny Andriamitantoa-Contribution à l'étude des bétons : influence des fines d'ajouts sur le comportement des bétons. Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, présenté en vue d'obtention du diplôme d'Ingénieur (2010)

[14] : RANDRIAMBOLOLOMANANA Patrice-Optimisation de la composition des briques pour stabiliser ses propriétés mécaniques. Université d'Antananarivo, Présenté en vue de l'obtention de diplôme d'Ingénieur (2018)

[15] : ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain -Formulation et modélisation mathématiques des comportements des bétons fluides à haute compacité par plans d'expérience. Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, présenté en vue d'obtention du diplôme de Doctorat (2020)

[16] : Jacques GOUPY-Les plans d'expériences

## **ANNEXES**

# ANNEXE 1 : DETERMINATIONS DES RESISTANCES

## MECANIQUES DES ECHANTILLONS A 7 JOURS

Les essais mécaniques sont déterminés selon la norme EN 196-1 ; les essais réalisés sont «la résistance à la compression" et "la résistance à la flexion".

- **Résistance à la flexion :**

Pour les essais de flexion, on utilise la méthode du chargement centré simple.

L'échantillon repose sur un dispositif comprenant deux appuis, et un troisième appui (tête de la machine) qui transmet la charge verticale, en entraînant la rupture de l'échantillon. Sa formule est :

$$R_{F07} = \frac{3}{2} \times \frac{F \times L}{l \times e^2}$$

$R_{F07}$  : résistance à la flexion à 7 jours

F : force de destruction indiqué par l'appareil

L : longueur de l'échantillon

l : largeur de l'échantillon

e : épaisseur de l'échantillon

Essai	L (mm)	l (mm)	e (mm)	F (DaN)	$R_{F07}$ moyenne (MPa)
1	159	35	35	2	0.016
	158	35	35	2	
	159	35	33	4	
2	160	35	34	16	0.060
	159	35	35	8	
	159	35	35	7	
3	157	35	36	12	0.040
	157	35	36	8	
	157	35	35	3	

4	158	35	37	1	0.007
	158	35	36	1	
	158	35	37	2	
5	156	35	37	8	0.030
	156	35	38	7	
	156	35	39	4	
6	158	35	38	14	0.081
	159	38	36	9	
	159	35	37	18	
7	160	35	37	16	0.069
	160	36	36	18	
	159	35	38	7	
8	157	35	33	3	0.014
	157	36	34	2	
	157	35	34	2	

- **Résistance à la compression :**

Le principe consiste à positionner les éprouvettes entre les plateaux d'une presse, puis soumettre progressivement à une charge jusqu'à la rupture par compression (écrasement sous charge axiale).

Comme chaque point de notre courbe est constitué par la moyenne des 03 valeurs des échantillons identiques, nos essais de compression ont été menés sur les 06 demi-éprouvettes fournies par l'essai de rupture à la traction par flexion. Ces demi-éprouvettes sont placés sur leurs faces latérales planes et subissent à leur tour la charge de destruction par compression.

$$R_{C07} = \frac{F}{S}$$

$R_{C07}$  : résistance à la compression à 7 jours

F : force de destruction indiqué par l'appareil

S : section de l'éprouvette

<b>Essai</b>	<b>F (DaN)</b>		<b><math>R_{C07}</math> moyenne (MPa)</b>
1	640	725	0.231
	560	540	
	725	640	
2	680	655	0.228
	480	600	
	700	675	
3	580	490	0.219
	700	630	
	540	700	
4	405	350	0.129
	340	330	
	365	350	
5	360	400	0.139
	420	330	
	340	430	
6	450	550	0.179
	440	510	
	490	530	
7	475	710	0.237
	710	715	
	650	850	
8	710	540	0.212
	555	500	
	710	500	

## **ANNEXE 2 : LES AUTRES ESSAIS PHYSIQUES**

- **Masse volumique et teneur en eau :**

La masse volumique est le rapport entre la masse de l'échantillon par son volume. Elle est obtenue par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{M}{V}$$

$\sigma$ : Masse volumique (Kg/L)

M : Masse de l'échantillon (Kg)

V : Volume de l'échantillon

La connaissance du taux d'absorption est très importante dans notre étude, car il influe directement la qualité du matériau. Cette opération consiste à immerger les échantillons dans de l'eau pendant 24 heures. On procède ensuite au pesage.

$$\text{Porosité \%} = \frac{\text{Masse humide} - \text{Masse sèche}}{\text{Masse sèche}} \times 100$$

<b>Essai</b>	<b>Masse humide (Kg)</b>	<b>Masse sèche (Kg)</b>	<b>Volume (L)</b>	<b>Masse volumique (Kg/L)</b>	<b>Porosité (%)</b>
1	0.346	0.225	0.243	0.924	53.77
2	0.366	0.243	0.246	0.986	50.61
3	0.300	0.187	0.225	0.832	60.42
4	0.272	0.171	0.164	1.041	59.06
5	0.322	0.217	0.218	0.997	48.38
6	0.287	0.196	0.214	0.916	46.42
7	0.301	0.211	0.228	0.924	42.65
8	0.343	0.234	0.246	0.950	46.58

- **Test de dureté :**

Ce test consiste à plonger les échantillons dans l'eau pendant 24 heures, de les sortir ensuite et de les gratter pour constater leur dureté.

Echelle de Mohs		
Dureté	Minéral	Test
1	Talc	Friable sous l'ongle
2	Gypse	Rayé par l'ongle
3	Calcite	Rayé par une pièce de monnaie
4	Fluorite	Facilement rayable avec un couteau
5	Apatite	Rayé au couteau
6	Orthose	Rayé avec une lime
7	Quartz	Raye une vitre
8	Topaze	Rayé par des outils au tungstène
9	Corindon	Rayé par le carbure de silicium
10	Diamant	Rayé par un autre diamant

- **Test au feu :**

La réaction au feu d'un matériau exprime son aptitude à s'enflammer, à contribuer au démarrage et à la propagation d'un incendie. On détermine la réaction au feu des matériaux de construction, d'isolation, de produits de décoration etc... Par des essais qui consistent à soumettre les produits à des sollicitations thermiques. On évalue ainsi leur comportement au feu par rapport à des critères de performance qui portent sur leur inflammabilité.

Euro classes (réaction au feu)					
Classes	Contribution énergétique à la propagation d'un incendie	Classification complémentaire			
		Production de fumée		Chute de gouttelettes et particules enflammées	
A1	Incombustible	-	-	-	-

A2	Pratiquement incombustible	S1	Faible production de fumée	d0	Pas de gouttelettes/particules enflammées
B	Résiste à une attaque prolongée des flammes et d'un objet isolé ardent tout en limitant la propagation de la flamme	S2	Production moyenne de fumée	d1	Gouttelettes/particules enflammées persistant moins de 10 secondes
C	Résiste à une attaque brève de flammes en limitant la propagation de la flamme et d'un objet isolé ardent				
D	Résiste à une attaque de petites flammes en limitant la propagation de la flamme et d'un objet isolé ardent	S3	Production importante de fumée	d2	Gouttelettes/particules enflammées persistant plus de 10 secondes
E	Résiste à une attaque brève de petites flammes en limitant la propagation de la flamme				
F	Aucune performance déterminée				

- **Résistance thermique :**

La résistance thermique d'un élément est sa capacité à limiter les pertes de chaleur. Il se calcule par l'épaisseur de l'élément (e) et sa conductivité propre ( $\lambda$ ).

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Les matériaux ayant une conductivité thermique élevée sont appelés "conducteurs" et ceux de faibles conductivités sont les "isolants".

La résistance thermique d'une paroi est la somme des résistances thermiques des éléments qui la compose.

$$R = R_{sciure} + R_{sable} + R_{chaaux} + R_{RHA}$$

<b>Matériaux</b>	<b>Proportion dans le mélange (%)</b>	<b>Epaisseur (m)</b>	<b>Conductivités thermique (W/m<sup>2</sup>.°C)</b>	<b>R Matériaux (m<sup>2</sup>/°C.W)</b>	<b>R Total (m<sup>2</sup>/°C.W)</b>
Bois	10	0.025	0.15	0.167	1.21
Sable	8	0.020	2	0.01	
Chaux	20	0.050	0.06	0.833	
RHA	28	0.070	0.35	0.2	

# **TABLE DES MATIERES**

REMERCIEMENTS .....	i
SOMMAIRE .....	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES .....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	viii
LISTE DES PHOTOS .....	x
LISTE DES ANNEXES.....	xi
INTRODUCTION.....	1
PARTIE 1 : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES.....	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES [1] [2] [3].....	2
I-1 DEFINITION : .....	2
I-2 CONSTITUANTS :.....	2
I-2-1 La matrice :.....	3
I-2-2 Les renforts :.....	3
I-2-3 Les additifs :.....	6
I-2-4 Les charges :.....	6
I-3 CLASSIFICATION :.....	6
I-4 MISE EN ŒUVRE DES MATERIAUX COMPOSITES : .....	7
I-5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES MATERIAUX COMPOSITES : .....	8
I-6 UTILISATIONS :.....	8
CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES MATIERES PREMIERES.....	9
II-1 LA SCIURE DE BOIS : [4] [5] [6] [7] [8] .....	9
II-1-1 Définition : .....	9
II-1-2 Les différents familles du bois :.....	9
II-1-3 Propriétés chimiques du bois : .....	10

II-1-4 Caractéristiques physiques du bois : .....	12
II-2 LA CHAUX : .....	15
II-2-1 Définition : [9] [10].....	15
II-2-2 Processus de fabrication de la chaux : [11].....	15
II-2-3 Classification de la chaux : [9] [10] [11] .....	16
II-2-4 Caractéristique de la chaux : .....	18
II-2-5 Les propriétés de la chaux : .....	19
II-2-6 Les avantages de la chaux :.....	20
II-2-7 Utilisation :.....	20
II-2-8 Les gisements de calcaire à Madagascar : [12].....	22
II-3 LES CENDRES DE BALLES DE RIZ : [9] [11] [13] .....	23
II-3-1 Définition : .....	23
II-3-2 Obtention des cendres de balles de riz :.....	23
II-3-3 Types :.....	24
II-3-4 Caractéristique de la silice : .....	25
II-3-5 Les propriété particulières de la silice : .....	26
II-3-6 Utilisation des cendres de balle de riz : .....	28
II-4 LE SABLE : [14] [15] .....	30
II-4-1 Définition : .....	30
II-4-2 Les différentes types de sable : .....	30
II-4-3 Propriétés : .....	31
II-4-4 Structure cristallin :.....	31
II-4-5 Caractéristiques des principaux constituants du sable :.....	32
CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES PLANS D’EXPERIENCE [15] [16].....	33
III-1 PRINCIPE DES PLANS D’EXPERIENCES : .....	33
III-2 DEMARCHE METHODOLOGIQUE : .....	34

III-3 CHOIX DE LA METHODE D'EXPERIMENTATION :	34
III-4 ANALYSE DES RESULTATS :	35
III-5 CONDITIONS D'APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCE :	35
III-6 VOCABULAIRES DE BASE DES PLANS D'EXPERIENCE :	36
III-6-1 Les facteurs :	36
III-6-2 Réponse :	37
III-7 LES TYPES DE PLANS D'EXPÉRIENCES :	43
III-7-1 Plans factoriels complets :	43
III-7-2 Plans factoriels complets à deux niveaux :	44
III-7-3 Plans factoriels complets à trois niveaux :	46
III-7-4 Plans fractionnaires :	46
III-7-5 Plans de mélange :	47
III-7-6 Plans hybrides :	49
III-8 STATISTIQUES APPLIQUES PAR LES PLANS D'EXPÉRIENCES :	49
III-9 LES LOGICIELS DE PLANS D'EXPERIENCES :	52
PARTIE 2 : ETUDES EXPERIMENTALES	2
CHAPITRE IV : PREPARATIONS ET CARACTERISATIONS DES MATIERES PREMIERES	54
IV-1 SCIURE DE BOIS :	54
IV-1-1 Préparation :	54
IV-1-2 Caractérisation :	55
IV-2 LA CHAUX :	55
IV-2-1 Approvisionnement :	55
IV-2-2 Caractérisation :	56
IV-3 LES CENDRES DE BALLE DE RIZ (RHA) :	57
IV-3-1 Fabrication de RHA :	57
IV-3-2 Caractérisation des RHA :	61

IV-4 LE SABLE :	61
CHAPITRE V : FORMULATION ET FABRICATION DES EPROUVETTES	62
V-1 FORMULATION :	62
V-2 FABRICATION DES EPROUVETTES :	62
V-2-1 Résultats résistances à la compression et à la flexion à 7 jours des essais préliminaires :	64
PARTIE 3 : MODELISATIONS PAR PLAN D'EXPERIENCE	54
CHAPITRE VI : APPLICATION DES PLANS D'EXPERIENCES DANS LE LOGICIEL JMP	65
VI-1 PERSPECTIVE DE L'ESSAI :	65
VI-2 NIVEAUX DES FACTEURS :	65
VI-3 CHOIX DU PLAN D'EXPERIENCE :	66
VI-4 FORMULATION SUIVANT LA MATRICE DES EFFETS :	67
VI-5 RESULTATS ET MODELISATION :	67
VI-5-1 Résultats et modélisation des essais mécaniques à 7 jours :	67
VI-5-2 Résultats d'autres essais physiques :	79
IV-5-3 Fabrication du model après optimisation :	83
PARTIE 4 : APPROCHE ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	65
CHAPITRE VII : ETUDES DE PRIX	85
V-I LE COUT DE 1 m <sup>2</sup> DE PLAQUE :	85
CHAPITRE VIII : APPROCHE ENVIRONNEMENTALES	87
VIII-1 IMPACTS NEGATIVES :	87
VIII-1-1 Impacts durant la fabrication des plaques :	87
VIII-1-2 Les mesures de prévention et d'atténuation :	88
VIII-2 IMPACTS POSITIFS :	88
CONCLUSION GENERALE	89
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	91

ANNEXES .....	90
ANNEXE 1 : DETERMINATIONS DES RESISTANCES MECANIQUES DES ECHANTILLONS A 7 JOURS .....	a
ANNEXE 2 : LES AUTRES ESSAIS PHYSIQUES .....	d
TABLE DES MATIERES .....	h

AUTEUR : RIVOANDRIAMANJATO Miariniaina

TITRE : « FORMULATIONS ET MODELISATIONS MATHÉMATIQUES DE MATERIAUX COMPOSITE A BASE DE SCIURE DE BOIS PAR PLAN D'EXPERIENCE»

Nombres de pages : 90

Nombres de tableaux : 32

Nombres de figures : 33

Nombres de photos : 29

Nombres d'annexes : 2



### RESUME

La valorisation de sciure de bois pour former un nouveau matériau performant et économique est le but de ce mémoire. Grâce au plan d'expérience, les expériences réalisées au laboratoire ont diminué, car si avec la méthode classique on a varié un par un les paramètres pour avoir leur optimum ; les plans d'expériences offrent la possibilité de les varier tous ensemble en même temps et nous montre l'influence des paramètres et ses interactions. La modélisation mathématique est l'outil parfait pour l'optimisation ou la prédiction.

Le logiciel JMP Pro 16 grâce à sa facilité d'usage, nous a permis de faire des analyses pour mieux comprendre précisément l'influence de chaque facteur et leur interaction pour une prise de décision rapide dans la formulation désirée.

Mots clés : Formulation, Modélisation mathématiques, Plan d'expérience, Interaction, Sciure, Chaux, RHA

### ABSTRACT

The recovery of sawdust to form a new efficient and economical material is the purpose of this thesis. Thanks to the Design Of Experiment, the experiments carried out in the laboratory have decreased, because if with the classic method we varied the parameters one by one to have their optimum ; the Design of Experiment offer the possibility of varying them all together at the same time and shows us the influence of the parameters and their interactions. Mathematical modeling is the perfect tool for optimization or prediction.

JMP Pro 16 software, with his easiness practice, allowed to us to carry out analyzes to better understand precisely the influence of each factor and their interactions for taking fast decision in the desired formulation.

Keys Word : Formulation, Mathematical Modeling, Design Of Experiment, Interaction, Sawdust, Lime, RHA

Adresse : 0514 D 253 Mahafaly Tomboarivo Antsirabe I

Tel : 0349951251

E-mail : [miariniainarivoandriamanjato@gmail.com](mailto:miariniainarivoandriamanjato@gmail.com)

Encadreur : Docteur ANDRIANANDRASANA Fanomezantsoa Alain